

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta chemická

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA CHEMICKÁ**

FACULTY OF CHEMISTRY

**ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ**

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

**MOŽNOSTI VYUŽITÍ CIHELNÉHO OBRUSU V  
ALTERNATIVNÍCH POJIVOVÝCH SYSTÉMECH NA BÁZI  
FLUIDNÍCH POPÍLKŮ**

POSSIBILITIES OF UTILIZATION OF BRICK-GRIND-DUST IN ALTERNATIVE BINDING SYSTEMS BASED  
ON FLUIDIZED ASH

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Václav Tušla

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.

**BRNO 2017**

## Zadání bakalářské práce

Číslo práce: FCH-BAK1084/2016  
Ústav: Ústav chemie materiálů  
Student: **Václav Tušla**  
Studijní program: Chemie a chemické technologie  
Studijní obor: Chemie, technologie a vlastnosti materiálů  
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.**  
Akademický rok: 2016/17

### Název bakalářské práce:

Možnosti využití cihelného obrusu v alternativních pojivových systémech na bázi fluidních popílků

### Zadání bakalářské práce:

Bakalářská práce si klade za cíl prověřit možnosti využití cihelného obrusu jako součásti alternativních pojivových systémů na bázi fluidních popílků.

### Termín odevzdání bakalářské práce: 19.5.2017

Bakalářská práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí bakalářské práce.

-----  
Václav Tušla  
student(ka)

-----  
Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.  
vedoucí práce

-----  
prof. RNDr. Josef Jančář, CSc.  
vedoucí ústavu

V Brně dne 31.1.2017

-----  
prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.  
děkan

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá využitím cihelného ohrusu v pojivových systémech na bázi popílků z fluidního spalování. Konkrétně se jedná o filtrové popílky a jemně mleté ložové popílky z fluidního spalování hnědého uhlí. Fluidní popílky mají, především díky obsahu volného vápna, anhydritu a ostatních složek, pojivové schopnosti. Cihelný ohrus vzniká při konečném formování vypálených cihel. Cílem práce je prověřit, zda je možné vyrobit kompozit vhodných vlastností s vysokým nebo dokonce výlučným obsahem fluidních popílků a cihelného ohrusu. Práce se rovněž zabývá vlivem některých chemických modifikujících přísad na tyto alternativní systémy.

## **Abstract**

This bachelor's thesis deals with usage of brick-grind-dust in alternative binding systems based on ashes of fluid combustion. Specifically it deals with fly ashes and softly milled bed ashes of brown coal combustion. Primarily thanks of content of free lime, anhydrite and other components, fluid ashes have binding properties. Brick-grind-dust arise in end formation of burned bricks. The aim of thesis is to verify, possibilities to create composite of appropriate abilities with high or even exclusive amount of fluid ashes and brick-grind-waste. The paper also deals with influence of some chemical modifying additive on this alternative systems.

## **Klíčová slova**

Výroba cihel, cihelný ohrus, fluidní popílky, využití druhotných surovin.

## **Key words**

Production of bricks, brick-grind-dust, fluid ashes, utilization of secondary raw materials.

TUŠLA, V. Možnosti využití cihelného obruš v alternativních pojivových systémech na bázi fluidních popílků. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2017 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.

#### Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího diplomové práce a děkana VUT.

.....

Václav Tušla

#### Poděkování

*Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Tomáši Opravilovi, Ph.D. za trpělivou pomoc při vypracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing Vlastimilu Bílkovi za pomoc při práci v laboratoři. V neposlední řadě i mé rodině za poskytnuté zázemí a podporu.*

# Obsah

1. Úvod .....	7
2. Teoretická část .....	8
2. 1. Cihelný obrus .....	8
2. 1. 1. Keramické suroviny .....	8
2. 1. 1. 1. Plastické suroviny .....	8
2. 1. 1. 2. Neplastické suroviny .....	9
2. 1. 2. Výroba cihel .....	10
2. 1. 2. 1. Příprava suroviny .....	10
2. 1. 2. 2. Vytváření .....	11
2. 1. 2. 3. Sušení .....	12
2. 1. 2. 4. Výpal .....	12
2. 1. 2. 5. Broušení .....	12
2. 1. 3. Vlastnosti cihelného obrusu .....	13
2. 2. Spalování uhlí a jeho produkty .....	14
2. 2. 1. Vysokoteplotní spalování .....	14
2. 2. 2. Popílký vysokoteplotního spalování .....	14
2. 2. 3. Fluidní spalování .....	14
2. 2. 4. Kotle pro fluidní spalování .....	14
2. 2. 4. 1. Atmosférické fluidní kotle se stacionární (bublinkující) vrstvou .....	15
2. 2. 4. 2. Atmosférické fluidní kotle s cirkulující fluidní vrstvou .....	15
2. 2. 5. Princip odsíření při fluidním spalování .....	16
2. 2. 6. Popílký fluidního spalování .....	16
2. 2. 6. 1. Hrubý ložový popel .....	16
2. 2. 6. 2. Fluidní filtrový (úletový) popílek .....	16
2. 3. Pojiva .....	17
2. 4. Vápno .....	18
2. 4. 1. Výroba vápna .....	18
2. 4. 2. Hašení a zpevňování vápna .....	18
2. 5. Plastifikační přísady .....	19
3. Experimentální část .....	20
3. 1. Stanovení volného vápna .....	20
3. 2. Příprava vzorků .....	21
3. 3. Měření objemových změn .....	22
3. 4. Hydraulický lis pro mechanické pevnosti .....	22

3. 5. Rentgenová difrakční analýza .....	23
3. 6. Měření velikosti částic.....	24
4. Výsledky a diskuze.....	26
4. 1. Pojivový systém na bázi fluidního filtrového popílku z elektrárny Tušimice a cihelného ohrusu .....	26
4. 2. Pojivový systém na bázi fluidního filtrového popílku z elektrárny Tušimice a cihelného ohrusu s přidavkem vápenné složky.....	28
4. 3. Pojivový systém na bázi fluidního filtrového popílku z elektrárny Tisová a cihelného ohrusu	30
4. 4. Pojivový systém na bázi fluidního filtrového popílku z elektrárny Tisová a cihelného ohrusu s přidavkem plastifikátoru .....	32
4. 5. Pojivový systém na bázi mletého fluidního ložového popílku z elektrárny Tisová a cihelného ohrusu .....	35
4. 6. Pojivový systém na bázi mletého fluidního ložového popílku z elektrárny Tisová a cihelného ohrusu s přidavkem plastifikátoru .....	37
5. Závěr.....	40
6. Literatura .....	41
7. Přílohy .....	44

## 1. ÚVOD

„*Kam s ním?*“ Ve svém fejetonu řeší Jan Neruda problém, co s odpadem. Závěrem nachází řešení – najít pro něj další využití [1]. Tato myšlenka je důležitá i v dnešní době, například při řešení otázky: co s odpadovými materiály z průmyslu? Termín odpadový materiál lze jednoduše zaměnit za výraz druhotná surovina. Podmínkou je najít pro ni využití.

V České republice hraje významnou roli těžba a následné použití uhlí jako paliva. Vedlejším produktem spalování v tepelných elektrárnách jsou tuhé zbytky spalování – popílký. V České republice se těchto popílků vyprodukuje, v přepočtu na obyvatele, nejvíce na světě. Vlastnosti těchto materiálů závisí na druhu paliva, typu spalování a i dané technologii v konkrétní elektrárně.

Trendem poslední doby je použití malt a alternativních pojiv např. polyuretanových pro tenké spáry při zdění. Tento postup již nepoužívá klasické malty, je rychlejší, jednodušší a spotřebuje se výrazně méně materiálu. Avšak jeho zavedením se zvýšily nároky na cihlářské výrobky, konkrétně se vyžaduje téměř hladký a rovný povrch a přesné rozměry zdících prvků. Proto se po vypálení cihly brousí. Tím získají přesný rozměr a na plochách pro pojivo jemné broušené drážky. Vedlejším produktem této finální operace je cihelný prach, neboli – cihelný ohrus. S rozvíjejícím se stavebnictvím a současnými trendy se předpokládá, že tohoto materiálu bude přibývat.

Základní myšlenkou této práce je najít využití pro odpadové materiály – fluidní popílek a cihelný ohrus. Tato práce se zabývá jejich základní charakteristikou. Následně využitím v pojivových systémech, jejichž vybrané vlastnosti budou zkoumány. Jedná se především o mechanické vlastnosti a objemovou stálost.



## 2. TEORETICKÁ ČÁST

### 2. 1. Cihelný obrus

Jako cihelný obrus se označuje prach po opracování cihlářských výrobků. Cihelný obrus vzniká především při výrobě mnohoděrovaných (dutinových) zdících tvárnic, jedná se v podstatě o odpadový materiál. Cihlářské výrobky jsou vypalované keramické výrobky na bázi jílových surovin.

Keramika je definována jako materiál, který je anorganický, nekovový a prakticky nerozpustný ve vodě. Jedná se o materiál s heterogenní strukturou, tvořenou nejméně z 30 % krystalickými látkami o různém složení a uspořádání. Dále pak obsahuje určitý podíl skelné fáze a pórů. Keramika se tvaruje z plastického těsta, poté se vysuší a své charakteristické vlastnosti získává po výpalu, kdy dojde ke slinování [2,3].

Keramika pochází z řeckého *keramos*, což značí původní název pro roh na pití. První dochované známky pocházejí z Číny v období  $10370 \pm 870$  let př. n. l., jedná se o hrubozrnnou, křehkou keramiku. První použití stavební keramiky se datuje do období 2000-100 př. n. l. do oblasti středního východu. První záznamy o cihlářské výrobě v Čechách jsou z 9. stol. a v 16. stol. se cihla vypalovaná v milířích stává používaným stavivem [3, 4].

Keramiku lze rozdělit na tradiční a progresivní keramiku. Do skupiny progresivní se zařazují materiály s význačnými vlastnostmi a oproti tradiční má menší počet fází, menší rozměry krystalů a vysokou čistotu. Dělí se na: funkční keramiku (přenos, regulace energií – elektronika, optika), konstrukční keramiku (odolnost vůči silným mechanickým, teplotním a chemickým vlivům) a biokeramiku (náhrada tkání). Skupina tradiční keramiky obsahuje: okrasnou, užitkovou, zdravotnickou, stavební a další [5].

#### 2. 1. 1. Keramické suroviny

Tradiční keramika je založena na výrobě ze surovin, které dávají po smíchání s vodou dobře tvárné, plastické těsto. Označují se plastické suroviny, hlavními představiteli jsou kaolíny, jíly a hlíny. Čím je výchozí surovina více tvárná, tím více dochází ke smrštění výrobku během sušení a výpalu. Z tohoto důvodu se přidávají suroviny, u kterých nedochází ke smrštění, označují se jako neplastické [3].

##### 2. 1. 1. 1. Plastické suroviny

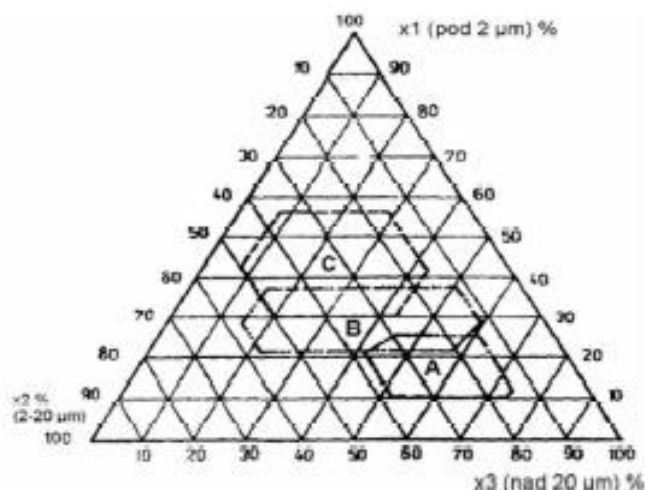
Podmínkou plastičnosti je dostatečný obsah jílovitých minerálů v zemině. Přehled zemin rozdělených podle obsahu typických jílových minerálů a podle zpevnění zeminy v místě naleziště je znázorněno, viz Tabulka 1.

Tabulka 1: rozdělení jílových minerálů v jílovitých zeminách [4]

Jílové zeminy	kaolinické a illitické	nezpevněné	kaoliny, jíly, anorganické pigmenty
		zpevněné	jílovce, lupky, jílové břidlice
	montmorillitické		bentonity
	illitické, chloritické, montmorillitické, kaolinitické	nezpevněné	hlíny, vápenité jíly, slíny
		zpevněné	hlínovce, slínovce

Jílové minerály mají destičkovitý tvar částic a vrstevnatý charakter, což zvyšuje plastičnost keramických směsí. Dalšími charakteristikami jílových minerálů, které podmiňují plastičnost je vysoká disperzita částic a schopnost iontové výměny na povrchu jílovité zeminy. Do skupiny dvojrvtvých minerálů lze začlenit kaolinit  $(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})_4$ , který je celkově nejvýznamnějším minerálem, a halloysit. Z hlediska struktury jde o střídající se vrstvy tetraedrů  $\text{SiO}_2$  a oktaedrů  $\text{AlO}_6$ . Jednotlivé prvky jsou vázány chemickými vazbami a vrstvy slabými Van der Waalsovými interakcemi. Kaolinit se nachází v různých stupních uspořádanosti sledů vrstev. Mezi trojvrstvé minerály se řadí montmorillonit  $\text{NaAl}_3\text{MgSi}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4$ , illit  $\text{KAl}_4(\text{Si}_7\text{Al})\text{O}_{20}(\text{OH})_4$ . Vrstvy jsou uspořádány tak, že se mezi dvěma tetraedry  $\text{SiO}_2$  nachází oktaedr  $\text{AlO}_6$  [3].

Směsi musí být složeny z hlediska zastoupení určitých minerálů a jejich zrnitosti tak, aby se daly tvarovat a po výpalu měly dané fázové složení, které zaručuje požadované pevnosti. Jílové zeminy se dle granulometrie dělí podle Winklerova diagramu, viz Obrázek 1. Oblast A označuje složení pro základní cihlářské výrobky, B pro děrované cihly určené pro zdění a C pro tenkostěnné výrobky a krytinu [3, 6].



Obrázek 1: Winklerův diagram podílů zrnitosti cihlářských výrobků [6]

### 2. 1. 1. 2. Neplastické suroviny

Jsou nezbytnou součástí skoro všech výrobních směsí, jejich použití je závislé na druhu výrobku a funkce jakou mají plnit. Lze je rozdělit na ostřiva, taviva a lehčiva. Některé skupiny mohou plnit více funkcí, například lehčiva a ostřiva [2, 3, 6].

Ostřiva snižují smrštění během sušení a výpalu, ale zvyšují teplotu slnutí, dále snižují tvárliivost. Ostřiva mohou být přírodní i umělá, lze je dělit podle chemické povahy – křemičitá, hlinitokřemičitá a zvláštní. Křemičitá ostřiva je z více jak 92 %  $\text{SiO}_2$ , jako zdroj se používá křemen, křemenec či křemenný písek. Křemen působením tepla mění modifikaci na otočnou, kdy nedochází k porušení vazeb. Další možností je změna na enantiotropní, kdy dojde k porušení vazeb a změně molárního objemu. Tyto objemové změny vyvolávají vnitřní pnutí. Křemenec je základní surovinou pro výrobu dinasů. Hlinitokřemičitá ostřiva – šamot, jsou vypálené jíly nebo lupky. Vypálením došlo ke stabilizaci vznikem určitého množství mulitu, který nepodléhá dalším výpalem změnám. Pro cihlářské účely se využívají odpady jako struska, popílek atd., které navíc plní funkci lehčiva [3, 6].

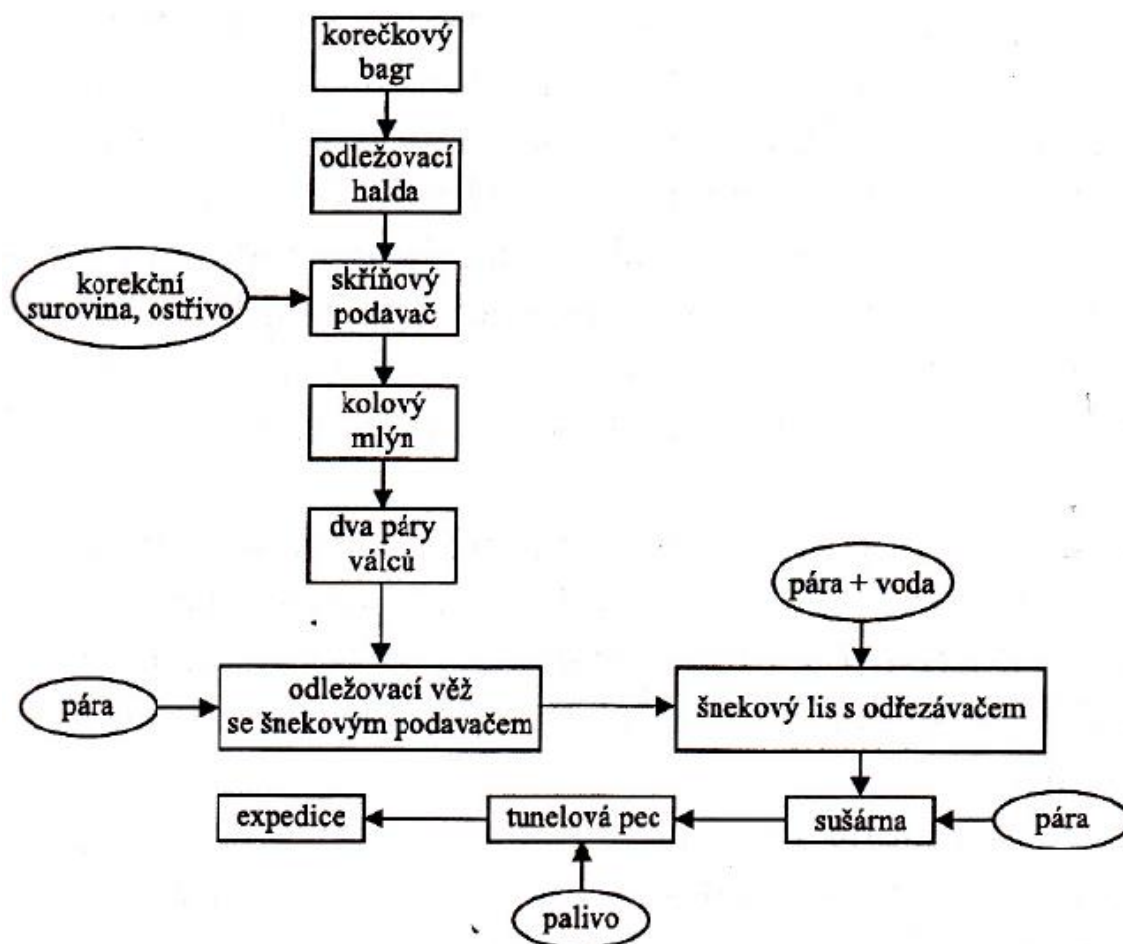
Taviva tvoří taveninu při výpalu a tím snižují teplotu tání. Základní skupinou jsou přírodní (živce, živcové horniny), dále existují taviva eutektická. Nejpoužívanější jsou živce – orthoklas ( $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ ), albit ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ ) a anorit ( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ). Eutektická taviva obsahují

tavící oxidy ve vhodné formě, které v žáru tvoří s  $\text{SiO}_2$  nízkotavitelné sloučeniny, zdrojem jsou uhličitany nebo mastek [6].

Lehčiva slouží ke snížení hmotnosti keramického střepu, zvyšují pórovitost, dále snižují tepelnou vodivost, ale také způsobují pokles pevnosti. Lehčiva, které působí nepřímo, tedy mají malou objemovou hmotnost, jsou škáry či křemelina. Druhou skupinu tvoří lehčiva, která vyhoří během výpalu, sem patří dřevěné piliny, uhlčný prach, sláma apod. [4, 6].

## 2. 1. 2. Výroba cihel

Technologie výroby závisí na typu konkrétního cihlářského výrobku. Cihelný obrus se v nejvyšší míře získává ze zdících mnohověrovaných výrobků, z toho důvodu je tato kapitola věnovaná technologii výroby těchto produktů. Základní schéma je zobrazeno, viz Obrázek 2.



Obrázek 2: schéma uspořádání cihlářské linky na výrobu děrovaných cihel [3]

### 2. 1. 2. 1. Příprava suroviny

Hlavní surovinou je cihlářská hlína, která tvoří přibližně 85 % celkového složení materiálu. Těží se na hliništi pomocí dobývacích strojů. Používají se korečková, či lžicová rypadla, popřípadě bagr. Již zde dochází k primární homogenizaci materiálu. Podle vlastností surovin a požadovaného výrobku se vybírá varianta přípravy surovin. Hlína z hliništi je smíchána s ostřivy a tavivy. Prvotní rozdrčení se uskutečňuje pomocí kladivového drtiče. Další mletí probíhá v kolovém mlýnu, následuje dvojí mletí přes mlecí válce na velikost 1,5 mm, posléze na 0,8 mm. Během mletí probíhá i homogenizace materiálů. Mletí má při přípravě surovin pozitivní vliv na vlastnosti cihelného střepu. Snižuje

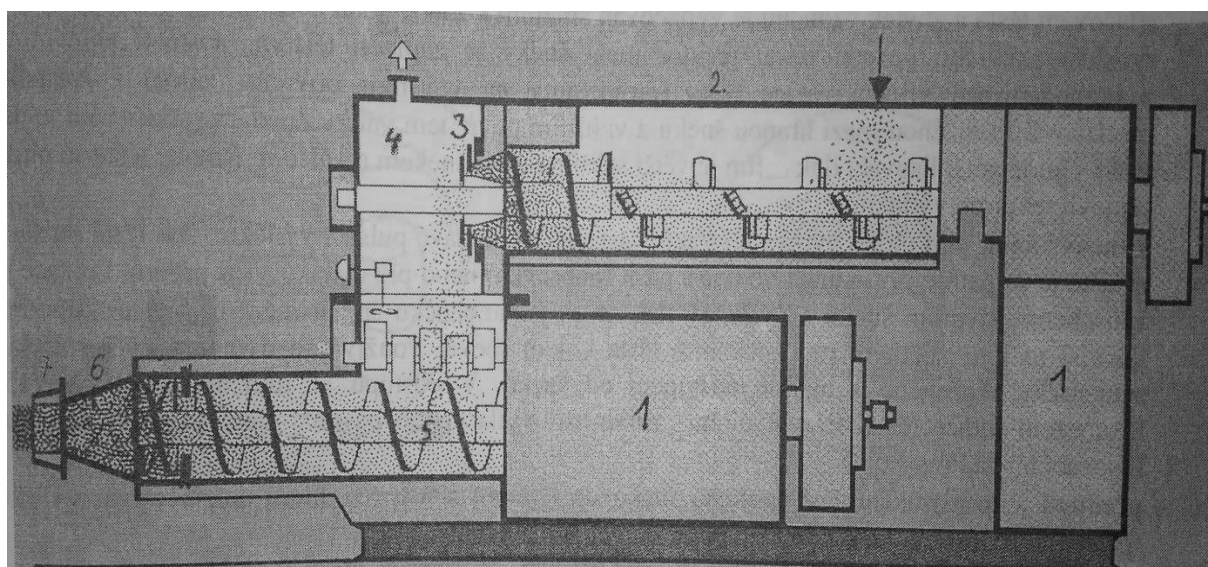
náchylnost k tvorbě textury při lisování, snižuje pórovitost a zvyšuje pevnosti i mrazuvzdornost. Proces mletí ale zvyšuje povrch zrna, a proto se zvyšuje množství rozdělovací vody, což vede k většímu smrštění. Každá surovina má optimální rozdělení velikosti částic vzhledem k výsledným vlastnostem střepu [4, 7].

Pomletá směs se pomocí pásových dopravníků dopravuje do odležovacích boxů, které fungují jako zásobárna suroviny. Dále zde probíhá navlhčení. Působením vody dochází k tvorbě mikrostruktur. Mezi vodou a jílovinou nastávají reakce, kdy dochází k bobtnání jílovitých minerálů. Efektivnost odležení je závislá na původních vlastnostech suroviny, nízký obsah vody má negativní vlastnosti na proces odležení [4, 8].

Z odležovacího boxu se pomocí pásových dopravníků dopraví materiál do vyrovnávacího podavače, kde se přidá potřebné množství vody a následuje mletí mokré směsi. Poté se do směsi přidá mokrá pára v přepařovacím mísidlu. Důvodem pro mokrou páru je, že zlepšuje homogenizaci i zpracovatelnost. Sníží množství rozdělovací vody. Dále klesne spotřeba energie při lisování a zkrátí se doba sušení [4, 7].

### 2. 1. 2. 2. Vytváření

Tvar výrobku je dán vytvářením, tedy procesem, kde se keramické těsto převede na výrobek konkrétních rozměrů. Pro tento účel se nejčastěji využívá lisování pomocí šnekového lisu, viz Obrázek 3.



Obrázek 3: náčrt vakuového šnekového lisu [4]

Číslo 1 označuje pohon. Navlhčená cihlářská směs se dopraví do mísiče (2), kde dochází k další homogenizaci a finálnímu přidavku vody, popřípadě přísad. Pomocí šneků se protlačí přes děrovanou desku (3), vznikají „nudličky“, které mají potrháný povrch, proto může dojít lépe k úniku vzduchu. Odvzdušnění probíhá ve vakuové komoře (4). Vzduch snižuje soudržnost částic, ve výsledku se zvýší pevnost a poklesne nasákavost výrobků. Ve šnekové komoře (5) dojde ke stlačení a těsto se posouvá směrem k ústí. Koncový šnek (6) vyrovnává pulsaci výtlaču, která vzniká otáčením šneku. Hlavní úlohu při srovnání rychlosti výtlaču sehrává předústí (7). Ústí je odlišné pro každý typ tvarovky. Tvarovky se liší děrováním, záleží na požadované tloušťce stěn a počtu děr. Ze šnekového lisu vychází tvarovaný polotovár, který je řezán strunou na požadovanou velikost [4, 7]. Obrázek 4 znázorňuje cihlářský výrobek po vytváření.

### **2. 1. 2. 3. Sušení**

Sušení je technologický proces, při kterém dochází k pozvolnému snižování obsahu vody na vlhkost, která je určena pro výpal. Teplota sušení je nižší než teplota varu vody, aby nedocházelo k porušení struktury. Vysušený výlisek ztrácí schopnost přetváření a přechází do stavu s vyšší pevností. Tím, že se odstraní voda, dochází ke shlukování částic k sobě, což vede k výslednému smrštění. Existuje více druhů sušáren, které se používají dle charakteru cihlářského výrobku, jedná se například komorové, velkoprostorové nebo o kanálové, které se používají pro dutinové výrobky [4, 6]. Obrázek 4 znázorňuje cihlářský výrobek po vysušení.

### **2. 1. 2. 4. Výpal**

Cílem výpalu je získat výrobek požadovaného tvar a definovaných vlastností. Pro stavební keramiku jsou zásadní tyto charakteristiky: pevnost v tlaku, objemová hmotnost, tepelná vodivost, mrazuvzdornost a barva. Výpal keramiky zahrnuje všechny fyzikální a chemické pochody, které jsou teplotně aktivované. Vysušený výrobek obsahuje fyzikálně vázanou vodu, která odchází do teploty 250 °C. Oxidace organických látek, jako jsou například piliny, probíhá při 350–500 °C. Teplota odpaření strukturně vázané vody závisí na konkrétním minerálu, obecně se jedná o interval 250–750 °C. Rozklad uhličitánů začíná probíhat od 500 °C. Jílovité zeminy přecházejí na metastabilní stavy. Příkladem je kaolinit, jenž při 560 °C přechází na metakaolin ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ), poté se okolo 900°C začíná degradovat krystalická mřížka a tvořit spinel ( $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$ ). Montmorillonit s ílitem reagují obdobně, ztrácí fyzikálně vázanou vodu a při teplotách do 850 °C respektive do 750 °C se degraduje krystalická mřížka za tvorby nejprve spinelu [4, 9].

Slinováním se materiál zpevňuje díky spojování částic působením teploty, aniž by docházelo k tavení. Při slinování se zachovává tvar, ale snižuje se pórovitost. Slinování může probíhat v systému bez kapalně fáze nebo v přítomnosti taveniny, které je častější. Tavenina se v cihlářské výrobě tvoří jen v omezeném množství, protože vypalovací teplota se pohybuje do 900 °C. Doba setrvání cihlářského výrobku v peci je přibližně jeden den, protože je nutné zajistit dostatečně pomalé chlazení, aby nedocházelo k vnitřnímu pnutí. V cihlářské výrobě se výpal provádí v kontinuálních tunelových pecích, které nahradily pece kruhové [4, 6, 7]. Obrázek 4 znázorňuje cihlářský výrobek po výpalu.



Obrázek 4: v pořadí zleva: nevysušený, vysušený a vypálený cihlářský výrobek [10]

### **2. 1. 2. 5. Broušení**

V dnešní době se převážně vždy spojují cihly pomocí lepidla, pro tento způsob je nutný hladký povrch cihly. Cihlářské výrobky mají však po výpalu nerovný povrch, navíc jsou ve středu nižší než na okrajích. Z těchto důvodů je nutné cihlu zbrousit. Bruska má dva kotouče o velikosti jeden metr, na nich je cihla zbroušená. Bruska je vyobrazena, viz Obrázek 5. Firma HELUZ obrousí 2 mm na každé straně. Například při výrobě HELUZ PLUS 40 broušená a produkci 650 palet denně, se jedná



přibližně o 18,5 m<sup>3</sup> cihelného ohrusu denně. Ohrus lze znovu vrátit do výroby, záleží ovšem na technologii procesu, pokud je toto řešení ekonomicky výhodné [7, 10].



Obrázek 5: bruska určená pro broušení cihel [10]

### 2. 1. 3. Vlastnosti cihelného ohrusu

Cihelný ohrus má stejné fyzikálněchemické vlastnosti jako cihlářské výrobky, v tomto případě děrované cihly. Nasákavost je 12 % [4]. Cihlářské výrobky obsahují křemen, živce a slídu, dále rengenamorfnní fázi (amorfnní bezvodé jíly). Tyto látky, jejichž příkladem může být metakaolin, ztratily během výpalu vodu a došlo ke zhroucení krystalové mřížky, mohou reagovat s hydroxidem vápenatým. Vznikají produkty  $C_4AH_{13}$ ,  $C_3AH_6$ ,  $C_2ASH_8$  a CAS, které vykazují hydraulické vlastnosti. Hydraulické vlastnosti znamenají schopnost látky tuhnout a tvrdnout po přidavku vody. Cihelný ohrus lze považovat za průmyslový pucolán. Pucolán je definován jako křemičitý nebo hlinitokřemičitý materiál, jenž v přítomnosti vody reaguje s hydroxidem vápenatým za vzniku sloučenin s pojivovými vlastnostmi [6, 9].

## **2. 2. Spalování uhlí a jeho produkty**

V České republice je uhlí nejvýznamnějším fosilním palivem. Hlavním důvodem pro spalování je výroba elektrická energie. Vedlejšími produkty jsou nespálené zbytky – popílký. Popílký se liší vlastnostmi, které jsou závislé na druhu a složení původního uhlí. Dále na technologii spalování a na typu spalovacího zařízení. Rozlišují se dva základní typy spalování – vysokoteplotní spalování a spalování na fluidním loži [11, 12].

### **2. 2. 1. Vysokoteplotní spalování**

Vysokoteplotní spalování probíhá za teplot 1150–1750 °C. V praxi se využívají dva typy kotlů – kotle roštové a práškové. Roštové kotle spalují kusová paliva v pevné vrstvě. V současné době se nově staví zejména pro biomasu. Práškové kotle spalují rozemletý prášek, rozměry částic se nacházejí pod 1 mm. Tyto částice mají velký měrný povrch, proto je zde intenzivnější spalování. Při spalování je uvolňován oxid siřičitý. Ten se ze spalin odstraňuje v odsiřovacích komorách vápenným mlékem, nebo vápencem. Vzniká energosádrovec, který lze dále využít jako druhotnou surovinu [12, 13].

### **2. 2. 2. Popílký vysokoteplotního spalování**

Popílký jsou produktem spalování uhlí. Liší se chemickými i fyzikálními vlastnostmi, které záleží na typu spalování a výchozí surovině. Díky vysokým teplotám dochází ke slinování a tak je obsah krystalické fáze přibližně 10 % a amorfní 90 %. Podle obsahu CaO se dělí na vápenaté, které vznikají spalováním hnědého uhlí, obsahují hmotnostní podíl 15–40 % CaO. Druhou skupinou jsou křemičité, které vznikají spalováním antracitu a lignitu a obsahují méně jak 5 % CaO a 40–65 % SiO<sub>2</sub>. Právě díky SiO<sub>2</sub>, který je přítomen ve velké míře, mají kyselý charakter. V České republice se využívají téměř výhradně křemičité popílký. Obsahují sklovitou fázi (60–83 %), mulit (4–25 %), křemen (4–8 %), magnetit (1–7 %) a hematit (0,5–2 %). Tyto popílký nejsou hydraulicky aktivní, nejsou schopny reagovat s vodou. Vykazují však pucolánovou aktivitu [14].

### **2. 2. 3. Fluidní spalování**

Fluidizace je děj, kdy se pevná látka drží ve vznosu díky proudu tekutiny, vyrovnává se vztlaková síla tekutiny a gravitační síla pevné látky. Kromě spalování se využívá při katalytických reakcích, sušení či dopravě sypkého materiálu [15].

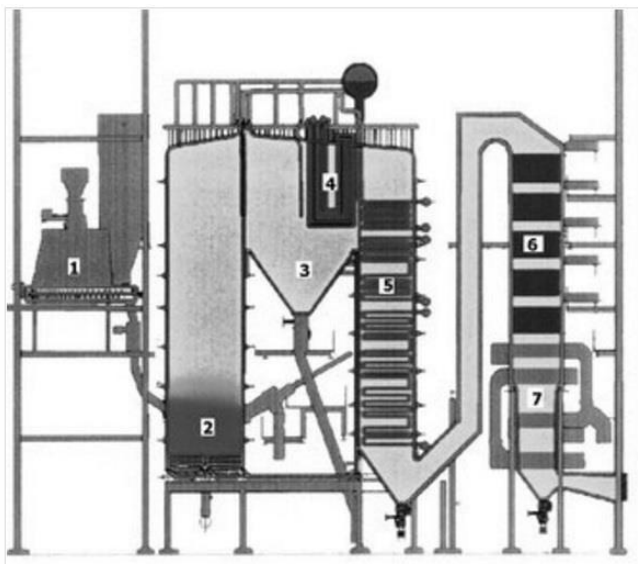
Na děrovaném dně kotle je nasypáno palivo, odsiřovací aditivum (vápeneč) a aditivum pro stabilitu fluidní vrstvy (písek). Touto směsí protéká plyn, při vhodné rychlosti se částice vynesou a vzniká fluidní vrstva. Každá částice je obalena plynem, zvětší se tedy povrch pro reakci se vzduchem. Tento proces zajišťuje vysokou účinnost spalování. Díky tomu je možno spalovat i méně kvalitní paliva. Spalovací teploty jsou v rozmezí 700 – 900 °C. Teplota je poměrně nízká, což vede k snížení obsahu NO<sub>x</sub> ve spalinách. Fluidní spalování se provádí s mletým vápencem, který slouží jako absorbent vznikajícího SO<sub>2</sub>. Fluidní kotle tedy nevyžadují odsiřovací zařízení spalin za kotlem. Nevýhodou fluidních kotlů jsou nároky na přesnou granulometrii paliva a s tím spojené náklady na mletí [12, 16].

### **2. 2. 4. Kotle pro fluidní spalování**

Existují dva typy kotlů: Atmosférické fluidní kotle se stacionární vrstvou (AFB) a atmosférické fluidní kotle s cirkulující fluidní vrstvou (ACFB). Rozdíl od AFB je ten, že se částice vracejí zpět do fluidní vrstvy, průměrná částice absolvuje tento cyklus 10–15×. Dochází k lepšímu vyhoření uhlíku i odsíření spalin [12].

#### **2. 2. 4. 1. Atmosférické fluidní kotle se stacionární (bublinkující) vrstvou**

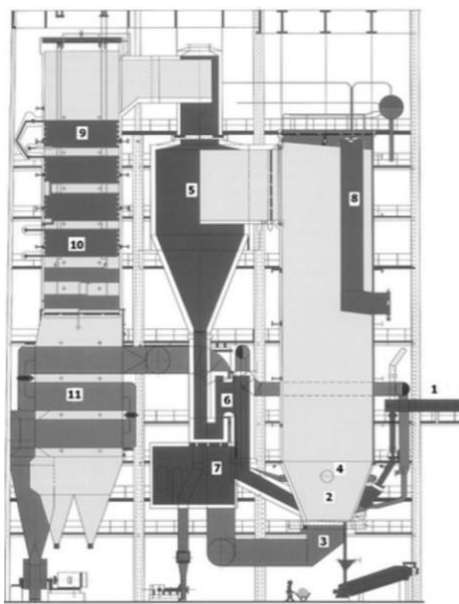
AFB mají fluidní vrstvu se zřetelnou hladinou. Schéma je zobrazeno, viz Obrázek 6. Do spalovací komory (2) je přiváděno palivo ze zásobníku (1). Skrze fluidní rošt je veden primární vzduch do spalovací komory a vytváří fluidní vrstvu. Spaliny spolu s popílkem jsou odváděny do mezitahu (3), kde jsou pomocí sekundárního vzduchu odvedeny tuhé části úletu. Teplo spalin se poté dále využívá – predehřívák (5), ekonomizér (6), ohřívák vzduchu (7) [12].



Obrázek 6: schéma atmosférického fluidního kotle se stacionární fluidní vrstvou [12]

#### **2. 2. 4. 2. Atmosférické fluidní kotle s cirkulující fluidní vrstvou**

Schéma ACFB je uvedeno, viz Obrázek 7. Směs paliva a vápence o patřičné granulometrii se přivádí (1) na fluidní vrstvu (2). Ta je přes rošt (3) promývána primárním vzduchem, který tvoří 70 % celkové spotřeby vzduchu. Sekundární vzduch (4) je přiváděn nad rošt. Spaliny s popílkem jsou odváděny do cyklonu (5), zde se odstraní 90 % prachových částic. Částice putují přes sifon (6) zpět do fluidní vrstvy. Pomocí chladiče (7) lze regulovat výkon kotle a také umožňuje přechod na jiná paliva [12].



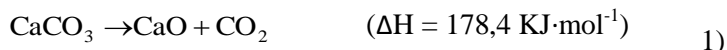
Obrázek 7: schéma atmosférického fluidního kotle s cirkulující vrstvou [12]



### 2. 2. 5. Princip odsíření při fluidním spalování

SO<sub>2</sub> je jednou z hlavních škodlivých emisí, které produkují elektrárny spalující tuhá paliva. SO<sub>2</sub> vzniká při spalování tuhých paliv, kde jsou sloučeniny síry přítomné. Černé uhlí obsahuje okolo 1 % síry a hnědé uhlí 1–8 % [17, 18].

Při procesu odsířování nejprve dochází k rozpadu vápence, viz rovnice 1.

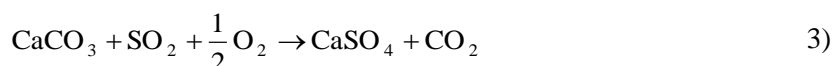


Následně při teplotě 600 – 1000 °C reaguje oxid vápenatý s oxidem siřičitým, produktem reakce je síran vápenatý, viz rovnice 2.



Teplota spalování by neměla přesáhnout 1050 °C, protože překročením této teploty vzniká tvrdě pálené vápno, které je méně reaktivní v důsledku změny porozity. Dále při vyšších teplotách dochází ke zpětné reakci a rozkladu síranu vápenatého na oxid vápenatý a oxid siřičitý [16].

Při spalování za vyššího tlaku zvýšený tlak zabrání rozkladu vápence. Reakce mezi CaCO<sub>3</sub> a SO<sub>2</sub> probíhá přímo, viz reakce 3 [20].



Při reakci 2 nedochází k úplné konverzi, protože póry jsou blokovány vznikajícím produktem. Molární objem CaSO<sub>4</sub> ku CaO je 2,7. Proto byly vyvinuty metody pro zvýšení efektivity reakce. Jedná se například o postup, kdy jsou vytvářeny velké póry v sorbentu pomocí octové kyseliny [20, 21].

### 2. 2. 6. Popílký fluidního spalování

Vlastnosti popílků z fluidního spalování se liší, záleží na typu spalování, principu odsíření a druhu kotle. Teplota fluidního spalování se pohybuje okolo 850 °C, proto se v popílcích netvoří sklovitá fáze, nebo mulit. Hlavními složkami jsou aluminosilikáty, anhydrit a měkce pálené vápno. Fluidní popílký vykazují hydraulické a pucolánové vlastnosti. SiO<sub>2</sub> reaguje se Ca(OH)<sub>2</sub> za tvorby C-S-H fáze. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reaguje s CaSO<sub>4</sub> a Ca(OH)<sub>2</sub> ve vodném prostředí za tvorby enttringitu (3 CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·3 CaSO<sub>4</sub>·30-32 H<sub>2</sub>O). Popílký lze rozlišit podle místa odběru na ložový a filtrový [13, 14].

#### 2. 2. 6. 1. Hrubý ložový popel

Hrubý ložový popel jsou objemné částice, které propadnou fluidní vrstvou. Obsahují větší množství měkce páleného vápna a anhydritu. Proto mají dobré hydraulické vlastnosti, už při smíchání s vodou tuhnou [16].

#### 2. 2. 6. 2. Fluidní filtrový (úletový) popílek

Filtrový popílek tvoří drobné, lehké částice, které se zachytávají v elektrostatických odlučovačích. Obsahuje menší množství měkce páleného vápna, vykazuje tedy menší hydraulické vlastnosti [16].

## 2. 3. Pojiva

Pojiva jsou látky nebo jejich směsi, které se vyznačují schopností samovolného zpevnění v kompaktní celek. Dobrá pojiva splňují čtyři základní vlastnosti. Pro dokonalé rozmístění v systému je zásadní počáteční tekutost. Důležité je, aby smáčely povrch výplně a tvořily adhezní spoje. Po daném časovém úseku se musí materiál samovolně zpevnit. Po ztuhnutí pojiva je nutno, aby zůstaly pevné i adhezní spoje [2].

Zpevňování se dělí na dvě etapy: tuhnutí a tvrdnutí. První fáze je tuhnutí a je charakteristická tím, že suspenze postupně ztrácí svoji plasticitu a tuhne v kompaktní celek. Tvrdnutí navazuje pozvolně, bez ostrého přechodu na tuhnutí. Zde začínají převažovat vlastnosti pevných materiálů, například nárůst pevnosti či tvrdosti. Tyto etapy jsou spojeny s chemickou reakcí, ta ovšem nevede ke zpevnění materiálu, pokud není doprovázena fyzikálním dějem. Nejčastěji se jedná o rekrystalizaci [2, 22].

Z praktického hlediska se pojiva dělí na stavební a technická. Stavební pojiva neboli maltoviny se v praxi produkují ve větším množství, do této skupiny patří například cement, sádra a vápno. Druhou skupinou jsou technická pojiva, například vodní sklo [2].

Alternativní pojiva jsou materiály, které mají pojivové vlastnosti. Tyto materiály mají do určité míry, například ve směsi s tradičním, snížit objem výroby tradičních pojiv. Zejména se jedná o cement, neboť při jeho výrobě se uvolňuje množství  $\text{CO}_2$ . Jedná se o látky, které vykazují pucolánovou či hydraulickou aktivitu, nebo jsou alkalicky aktivované. Tyto látky jsou přírodní pucolány (tufy, křemelina), technogenní pucolány (elektrárenské popílký, struska, metakaolin, cihelná drť) [23].

## 2. 4. Vápno

Ve smyslu názvosloví jsou vápna definována jako pojiva, jejichž hlavní složky jsou  $\text{CaO}$  a  $\text{Ca(OH)}_2$  s nepatrnými podíly  $\text{MgO}$ ,  $\text{Mg(OH)}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Ve stavebnictví se přidává předpoklad, že surovina je pálena pod mez slnutí[24]. Vápno jako maltovina se získává z přírodních vápenců ( $\text{CaCO}_3$ ), které obsahují různé podíly nečistot. Výchozí surovina se pálí při takové teplotě, aby byl meziprodukt schopen dostatečně rychlé hydratace na výsledný produkt, který je hlavní aktivní složkou pojiva [2].

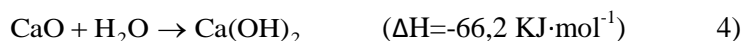
### 2. 4. 1. Výroba vápna

Základní surovinou jsou formy přírodních vápenců a dolomitů. Rozklad vápence probíhá podle rovnice 1, kdy vzniká pálené vápno ( $\text{CaO}$ ) a oxid uhelnatý. Kvalita získaného oxidu vápenatého záleží na teplotě a rychlosti výpalu. Dále na velikosti zrn, zastoupení jednotlivých frakcí a na složení pecní atmosféry [24]. Nejvíce kvalitní vápno vzniká rozkladem při nejnižší teplotě, kdy se plně rozkládá výchozí vápenec. U dolomitických vápenců se jedná o 900-1000 °C. Výpal při vyšších teplotách vede k růstu krystalů a tím ke zmenšení měrného povrchu, který by mohl reagovat s vodou. Nejrozšířenějšími pecemi jsou rotační a šachtová pec. Rotační má nejvyšší denní výkonost, ale i nejvyšší spotřebu tepla. Nejvyšší tepelné účinnosti se dosahuje použitím šachtových pecí [2, 24].

Vápna se rozdělují na vzdušná a hydraulická. Ve vzdušných zaujímá majoritní podíl složka  $\text{CaO}$ , popřípadě menší podíl  $\text{MgO}$ . Podle ČSN 72 2230 je pro vzdušné bílé vápno obsah těchto dvou složek nejméně 85 %, přičemž obsah  $\text{MgO}$  není vyšší jak 7 %. Pokud je obsah vyšší jak 7 %, jedná se o vápno dolomitické. Hydraulická vápna obsahují nejméně 10 % hydraulicky aktivních látek ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) [2, 24].

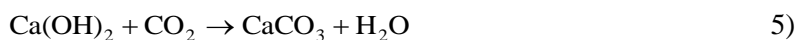
### 2. 4. 2. Hašení a zpevňování vápna

Hašení vápna probíhá dle rovnice 4, jedná se o hydrataci páleného vápna. Rychlost závisí na velikosti a pórovitosti zrn, dále na chemickém složení. Menší krystalky vzniklého hydroxidu vápenatého dodávají vápenné kaši lepší tvárlivost. Velikost vzniklého krystalu je ovlivněna velikostí krystalu oxidu vápenatého, teplotou hašení a množstvím vody [2].



Mokré hašení probíhá za přebytku vody za vzniku kaše, v průběhu by neměla teplota překročit 100 °C, což se reguluje přidáním vody. Produktem suchého hašení je prášek, neboť se přidá se jen malý přebytek vody, který se vyprodukovaným teplem odpaří [2].

Tuhnutí a tvrdnutí vzdušného vápna je dáno souhrou několika procesů. Primární ztuhnutí je realizováno odsátím či odpařením vody. Díky této skutečnosti se vzdušné vápno řadí do vzdušných pojiv. Díky odparu vody z prostoru mezi zrny a následnému působení kapilárních sil se shlukují částice gelové sítě hydroxidu. Dalším procesem je rekrystalizace  $\text{Ca(OH)}_2$ , vzniká minerál portlandit, a tento děj se již nejspíše podílí na tvrdnutí. Karbonatací vzniká kalcit a reakci lze popsat rovnicí 5. Jedná se o pomalejší proces, díky relativně nízkému obsahu  $\text{CO}_2$  ve vzduchu [2, 5].



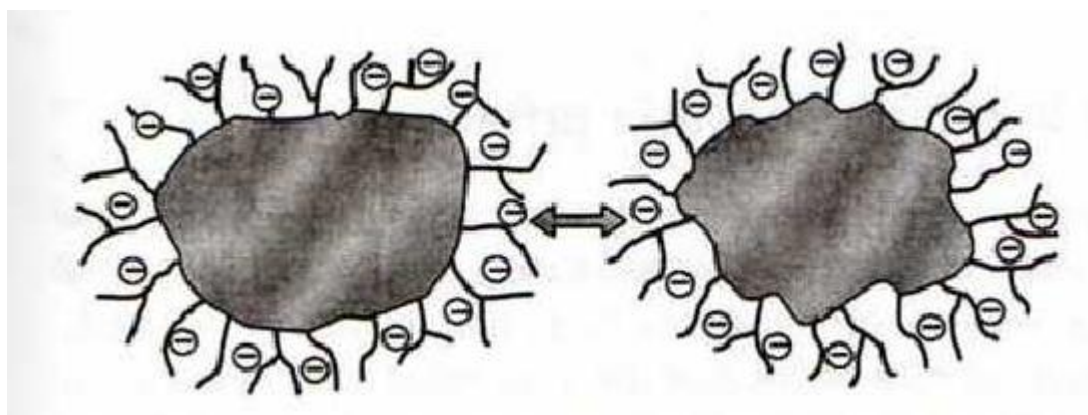
## 2. 5. Plastifikační přísady

Plastifikační přísady neboli přísady redukující dávku vody, ovlivňují reologické vlastnosti čerstvé směsi i vlastnosti zatvrdnutého výrobku. Jedná se o látky, které při nezměněné konzistenci umožňují snížit dávku vody. Nebo při stejné dávce vody zlepšují zpracovatelnost. Snížení vodního součinitele se projeví zvýšením pevnosti, dále je ovlivněn modul pružnosti či smrštění. Použití plastifikátoru zvyšuje nároky ekonomické nároky. Plastifikátory se dělí podle účinku, tedy o jaké množství záměsové vody jsou schopny snížit, aniž by se změnila konzistence betonu [25].

První skupinou jsou obvyčejné plastifikační přísady, které snižují množství vody o 5–15 %. V průmyslu se vyrábějí tyto plastifikační přípravky na bázi lignosulfátů a jejich derivátů, hydrokarboxylových kyselin a jejich derivátů nebo karbohydrátů [25].

Druhou skupinou jsou superplastifikátory, které snižují množství záměsové vody o více jak 15 %. Superplastifikátory mají účinnou látku na bázi modifikovaných lignosulfátů, sulfonovaných melamin-formaldehydových nebo naftalen-formaldehydových kondenzátů. Mechanismus spočívá v disociaci funkčních skupin ( $-\text{COOH}$ ,  $-\text{SO}_3\text{H}$ ), vzniklé anionty reagují s kationty zrna. Nereagují takto veškeré funkční skupiny plastifikátoru. Právě tyto skupiny mají za následek odpuzování zrn od sebe. Tyto látky dokáží snížit množství vody o 15 – 30 % [25].

Superplastifikátory na bázi polykarboxylátů dokáží snížit množství záměsové vody i o více jak 30 %, bývá pro ně vyčleněna zvláštní třída, pod názvem superplastifikátory nové generace. Zvýšení efektivity superplastifikátorů je dáno tím, že kromě dispergačního účinku vlivem elektrického náboje, přistupuje sférický efekt, viz Obrázek 8. Navázaná skupina zaujímá velký objem, proto se nemohou shlukovat [25].



Obrázek 8: zobrazení dispergačních účinků na zrno [25]

CHRYSO Fluid Optima 208 je superplastifikátor nové generace na bázi modifikovaných karboxylátů. Jedná se o hnědozelenou kapalinu s hustotou  $1,05 \text{ kg/m}^3$ . Obsah alkálií (ekv)  $\text{N}_2\text{O}$  je menší nebo roven 1,4 % a pH je  $7 \pm 2$ . Doporučené dávkování dané výrobcem je 0,3–3 % na hmotnost cementu. Při dávkování do automícháče uvádí výrobce, že by se směs měla míchat minimálně 6 min [26].

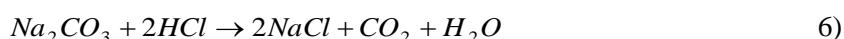
### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V následující části jsou popsány postupy a přístrojové vybavení, jež byly použity při tvorbě této práce.

#### 3. 1. Stanovení volného vápna

Volné vápno ve fluidním popílku lze stanovit sacharátovou metodou. Principem je vznik sacharátu vápenatého, který následně reaguje s odměrným roztokem HCl, dle normy ČSN 72 2080. Postup je popsán níže a výsledky jsou uvedeny, viz Tabulka 2.

- Byl připraven odměrný roztok HCl, který byl standardizován pomocí vysušeného Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dle reakce 6 na indikátor methylovaný (přechod 3,1-4,4).



- Do odměrné baňky (500 ml) bylo nalito 50 ml destilované vody, poté přililo přibližně 9 ml koncentrované (35%) HCl, baňka byla doplněna po rysku.
- V sušárně na 105 °C po dobu 2 hod. byl vysušen Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.
- Bylo odebráno 0,17 g Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> s přesností na 1 mg do titrační baňky a toto množství bylo rozpuštěno v 20 ml destilované vody.
- Roztok Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> byl titrován odměrným roztokem HCl na methylovaný do prvního barevného přechodu (z oranžové na tmavší oranžovo-červenou).
- Poté byla směs krátce povařena, aby došlo k odstranění CO<sub>2</sub>.
- Směs byla dotitrována do prvního stálého červeného zbarvení.
- Byla vypočítána koncentrace standardu, pomocí vztahu viz rovnice 7.

$$c(\text{HCl}) = \frac{m(\text{Na}_2\text{CO}_3)}{M(\text{Na}_2\text{CO}_3)} \cdot \frac{1}{V(\text{HCl})} \quad 7)$$

- Bylo naváženo 1-1,5 g popílku s přesností na 1 mg do plastové Erlenmayerovy baňky.
- Do této baňky bylo odváženo 10 g sacharózy a bylo odměřeno 50 ml destilované vody.
- Baňka byla třepána po dobu 15 min.
- Poté byla směs odfiltrována za sníženého tlaku pomocí elektrické vývěvy.
- Filtrát byl kvantitativně převeden z Erlenmayerovy baňky do titrační baňky.
- Byla provedena titrace na fenolftalein (přechod 8,2-10) ze světle fialové do odbarvení pomocí odměrného roztoku HCl.
- Dále byl vypočítán obsah volného vápna, pomocí vztahu viz rovnice 8.

$$w(\text{CaO}) = 100 \cdot \frac{C(\text{HCl}) \cdot V(\text{HCl}) \cdot \frac{M(\text{CaO})}{2}}{m(\text{popílek})} \quad 8)$$

Tabulka 2: obsah volného CaO

popílek	obsah CaO [% hm.]
Tušimice filtrový	6,81
Tisová filtrový	4,29
Tisová mletý ložový	20,09

### 3. 2. Příprava vzorků

Byly připraveny vzorky pro měření pevnosti a dilatace. Záměsi byly míšeny pomocí laboratorní míchačky. Nejprve byl nalit potřebný podíl destilované vody. Do něj byly přisypány sypké materiály (popílek, cihelný ohrus). Směs byla upravena tak, aby měla stejnou konzistenci. Byl vypočítán poměr w/c, tedy poměr mezi hmotností vody a hmotností sypkých složek, tedy popílku i cihelného ohrusu. Vápenná kaše byla připravena z vápenného hydrátu v hmotnostním poměru 1 : 1 s destilovanou vodou, dávkování bylo 20 % na celkovou hmotnost cihelného ohrusu a fluidního popílku. Při zpracování směsí, ve kterých se používal plastifikátor, se plastifikátor nadávkoval do destilované vody v daných hmotnostních procentech na hmotnost popílku. Takto připravené směsi byly plněny do forem, použité formy jsou zobrazeny, viz Obrázek 19. Malá zkušební tělesa mají rozměry 20 mm × 20 mm × 100 mm, velká 40 mm × 40 mm × 160 mm. Do velkých forem byly pomocí plastelíny upevněny kontakty pro měření dilatace. Formy byly naplněny a zhutněny na vibračním stole. Následně byly ponechány 24 hod zrát ve vlhké atmosféře, poté bylo provedeno odformování. Zkušební tělesa byla ponechána ve zrací komoře při teplotě 20 °C a vlhkosti 90–100 %.



Obrázek 9: formy pro přípravu zkušebních těles

### 3. 3. Měření objemových změn

Objemové změny byly měřeny pomocí Graf-Kaufmanova přístroje, viz Obrázek 10. Přesnost měření byla 0,01 mm. Byla vypočítána relativní změna délky tělesa vzhledem k celkové délce. Zkušební těleso bylo vždy měřeno ve stejné pozici a v pozici otočené o  $180^\circ$ , z těchto hodnot byl vypočten průměr.



Obrázek 10: pomůcka pro měření objemových změn Graf - Kaufmanův přístroj

### 3. 4. Hydraulický lis pro mechanické pevnosti

Mechanické vlastnosti byly měřeny na hydraulickém lisu DESTTEST 3310, viz Obrázek 11. Byl použit lis BS-10, pro měření pevnosti v tahu za ohybu. Přesnost měření udávaná výrobcem je 1 %. Minimální lisovací síla pro lis BS-10 je 0,2 kN, pro lis BS-300 je 6 kN [27].



Obrázek 11: hydraulický lis DESTTEST 3310

### 3. 5. Rentgenová difrakční analýza

Rentgenová difrakční analýza (XRD) je metoda pro analýzu struktury pevných látek. Každá krystalická látka má jedinečný difrakční záznam (difraktogram), díky které je možná její identifikace. Rentgenové záření může s hmotou interagovat více způsoby. Pro studium krystalových struktur je důležité difraktované záření, neboli interakce rentgenového záření s elektrony atomů, které jsou v pružném rozptylu. Po ozáření krystalického materiálu, jenž má periodicky uspořádané atomy, dochází k ohybu a interferenci. Vznikají difrakční maxima, jejichž poloha, intenzita a tvar charakterizuje daný atom. Tato metoda poskytuje také kvantitativní analýzu. K difrakci dojde pouze, je-li splněna Braggova difrakční podmínka, viz rovnice 9.

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \Theta \quad 9)$$

Kde  $n$  je celé číslo,  $\lambda$  značí vlnovou délku,  $d$  vzdálenost mezi rovinami a  $\Theta$  úhel, pod kterým dopadají paprsky rentgenového záření na strukturní rovinu. K difrakci tedy dochází pouze, když záření dopadá pod daným úhlem a zároveň vzdálenost mezi rovinami se rovná celému násobku vlnové délky rentgenového záření. [28, 29, 30].

Rentgenová difrakční analýza byla provedena na přístroji Empyrean od firmy Panalytical, viz Obrázek 12. Přístroj je vybaven komorou pro měření vzorků za vyšších teplot a také komorou s řízenou vlhkostí [28]. Výsledky analýzy výchozích surovin jsou uvedeny, viz Tabulka 3. Záznamů RTG analýz jsou uvedeny v příloze, viz Obrázek 35-41.



Obrázek 12: Rentgenový difraktometr Empyrean od firmy Panalytical [28]

Tabulka 3: charakteristika výchozích surovin pomocí rentgenové difrakční analýzy

	Cihlený obruš B	Cihelný obruš Family	Tušimice filtrový popílek	Tisová filtrový popílek	Tisová ložový mletý popílek
křemen	+++	+++	++	++	++
augit	+	+	-	-	-
albit	+	+	+	+	+



muskovit	+	+	+	+	+
akermanit - gehlenit	+	+	-	-	-
ortoklas	+	+	+	-	+
hematit	+	+	+	+	+
anhydrit	-	-	+++	++	++
CaO	-	-	++	++	+++
kalcit	-	-	+	+	+
anatas	-	-	+	+	-
Ca(OH) <sub>2</sub>	-	-	+	-	+
rutil	-	-	-	+	+
magnetit	-	-	-	+	-

*Fáze je přítomná ve značném množství* +++

*Fáze je přítomná* ++

*Fáze je přítomná v malém množství* +

*Fáze není přítomná* -

### 3. 6. Měření velikosti částic

Pomocí laserového analyzátoru je možné změřit velikost částic práškového materiálu v rozsahu 0,1–1750 µm. Princip spočívá v difrakci laserového paprsku. Paprsek prochází celou, kterou protékají částice měřené látky. Zaznamená se difrakční obrazec. Velikost částic se určí z difrakčního obrazce použitím Fourierovy transformace [28]. Analýza byla provedena na přístroji SYMPATEC HELOS KR, viz Obrázek 13 a analýza vzorků byla provedena programem WINDOX 5 [31].



Obrázek 13: Laserový analyzátor velikosti částic SYMPATEC HELOS KR [31]

Výsledky síťové analýzy použitého cihelného obrusu, jsou uvedeny, viz Tabulka 4.

Tabulka 4: hmotnostní zastoupení jednotlivých frakcí cihelného obrusu

Frakce rozdělené dle velikosti ok [mm]	<0,063	0,063-0,105	0,105-0,2	0,2-0,4	0,4-0,8	0,8-1,4	>1,4
CO B [g]	73,3	5,2	3,3	3,7	5,1	5,8	3,6
CO Family [g]	69,9	4,9	4,2	3,3	6,1	5,7	5,4

Pro frakci cihelného obrusu, menší jak 0,063 mm, byla pomocí laserového analyzátoru HELOS změřena velikost částic. Vybrané charakteristiky jsou vedeny, viz Tabulka 5. Z výsledků je patrné, že se z hlediska distribuce velikosti částic jedná o téměř shodné materiály.

*Tabulka 5: vybrané charakteristiky velikosti částic cihelného obrusu z frakce menší jak 0,063 mm*

	CO B [ $\mu\text{m}$ ]	CO Family [ $\mu\text{m}$ ]
D <sub>50</sub>	4,39	4,10
D <sub>90</sub>	34,57	33,58
modus	12,75	8,72

Dále byly analyzovány fluidní popílky, vybrané charakteristiky jsou uvedeny, viz Tabulka 6.

*Tabulka 6: vybrané charakteristiky velikosti části fluidních popílků*

	Tušimice filtrový [ $\mu\text{m}$ ]	Tisová filtrový [ $\mu\text{m}$ ]	Tisová ložový mletý [ $\mu\text{m}$ ]
D <sub>50</sub>	18,62	15,07	43,56
D <sub>90</sub>	110,38	104,20	208,57
modus	62,98	34,32	150,63

Příklady záznamů měření velikostí částic jsou zobrazeny, viz Obrázek 30–36 v příloze.

## 4. VÝSLEDKY A DISKUZE

V této kapitole jsou uvedeny použité suroviny, dále jsou uvedeny receptury, podle kterých byla připravena zkušební tělesa. Následně jsou graficky zobrazeny výsledky zkoušek pevností v tlaku a objemových změn zkušebních těles.

### Vysvětlivky

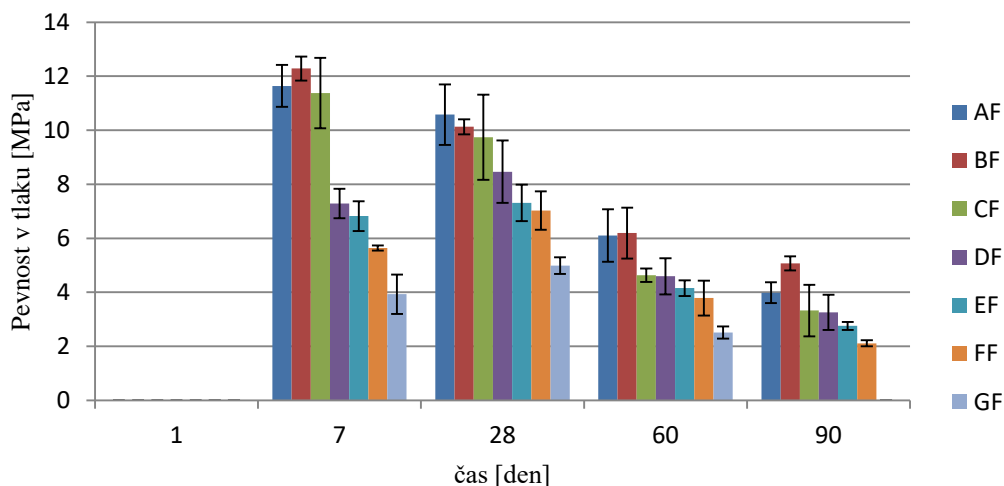
Elektrárna Tušimice – filtrový popílek	F
Elektrárna Tisová – filtrový popílek	TIF
Elektrárna Tisová – ložový popílek mletý	TIL
Cihelný obrus firmy HELUZ	CO
Poměr hmotnosti vody ku celkové hmotnosti pevných materiálů	w/c

### 4. 1. Pojivový systém na bázi fluidního filtrového popílku z elektrárny Tušimice a cihelného obrusu

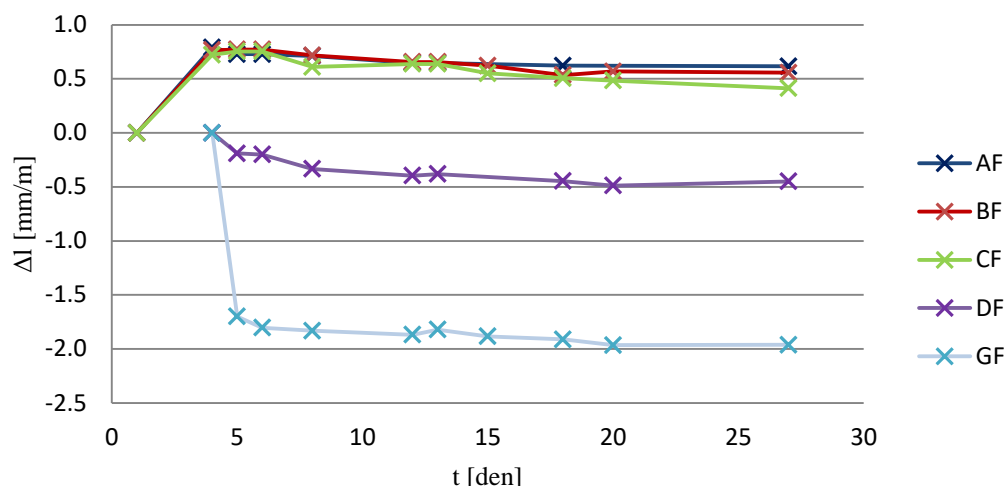
Experimenty popsané v této kapitole studují možnosti využití cihelného obrusu v pojivovém systému společně s fluidním filtrovým popílkem z elektrárny Tušimice. V experimentech je sledován vliv přídavku cihelného obrusu do systému popílek-obrus. Složení testovacích směsí je uvedeno, viz Tabulka 1a výsledky viz Obrázek 14 a 15.

Tabulka 7: namíchané směsi filtrového popílku Tušimice a cihelného obrusu, označení a složení

Označení	A <sub>F</sub>	B <sub>F</sub>	C <sub>F</sub>	D <sub>F</sub>	E <sub>F</sub>	F <sub>F</sub>	G <sub>F</sub>
TF [% hm.]	100	95	90	80	70	50	30
CO [% hm.]	0	5	10	20	30	50	70
TF [g]	1000	760	630	560	490	350	225
CO [g]	0	40	70	140	210	350	525
voda [g]	735	569	480	478	411	373	374
w/c	0,74	0,72	0,69	0,68	0,59	0,52	0,50
celková hmotnost pevného podílu [g]	1000	800	700	700	700	700	750



Obrázek 14: graf pevností v tlaku zkušebních těles z filtrového popílku Tušimice v čase



Obrázek 15: graf objemových změn zkušebních těles z filtrového popílku Tušimice v čase

### Vyhodnocení:

Z obrázku 14 je patrné, že čím mají zkušební tělesa vyšší obsah filtrového popílku, tím mají vyšší pevnosti v tlaku. Popílek má vhodné složení pro tvorbu ettringitu, který je velmi pravděpodobně i nositelem pevností připravených vzorků. Avšak u vzorků BF obrusu docházelo k naměření vyšších pevností. To je pravděpodobně způsobeno pucolánovou aktivitou přidaného cihelného obrusu. Lze tedy konstatovat, že v dlouhodobém horizontu budou nejvyšších pevností dosahovat vzorky s malým obsahem cihelného obrusu. Tento trend bude možné potvrdit až po delším čase 360 dní a více, bohužel čas vymezený pro bakalářskou práci byl kratší. Svých maxim dosáhly pevnosti v tlaku při měření po sedmi dnech zrání, poté se pevnosti začali snižovat. Zřejmě díky reakci ettringitu za vzniku fází o nižších pevnostech.

Na obrázku 15 je patrné, že u zkušebních těles s vyšším obsahem filtrového popílku dochází zpočátku k růstu objemu. Důvodem je tvorba ettringitu, který zaujímá větší objem především díky obsahu 32 molekul vody. Naopak u těles s nižším obsahem filtrového popílku se výrazněji projeví smrštění vlivem vysychání, neboť cihelný obrus je velice porézní a dokáže pojmout velké množství vody, která v průběhu času pomalu odchází.

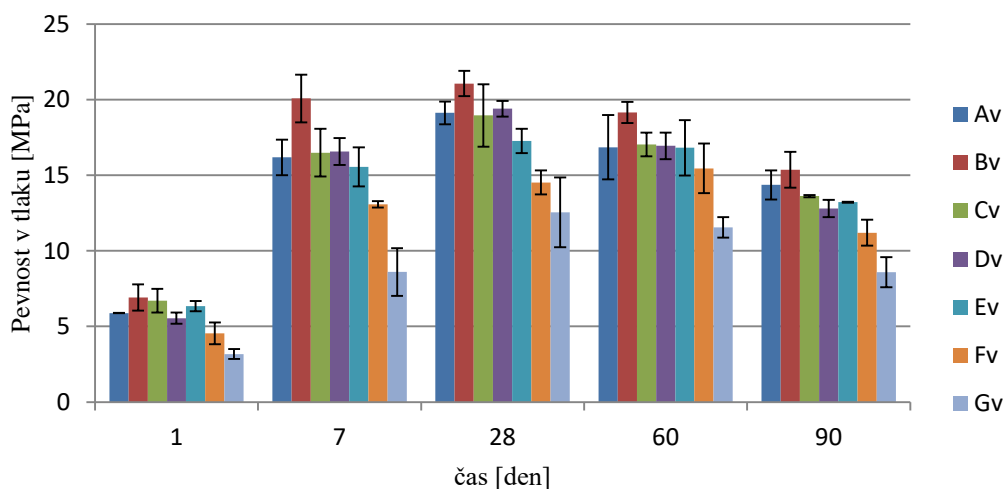
## 4. 2. Pojivový systém na bázi fluidního filtrového popílku z elektrárny Tušimice a cihelného obru s přidavkem vápenné složky

Experimenty popsané v této kapitole studují možnosti využití cihelného obru v pojivovém systému společně s fluidním filtrovým popílkem z elektrárny Tušimice. V experimentech je sledován vliv přidavku vápenné složky do studovaného systému popílek-obrus. Složení testovacích směsí je uvedeno, viz Tabulka 8a výsledky viz Obrázek 16 a 17.

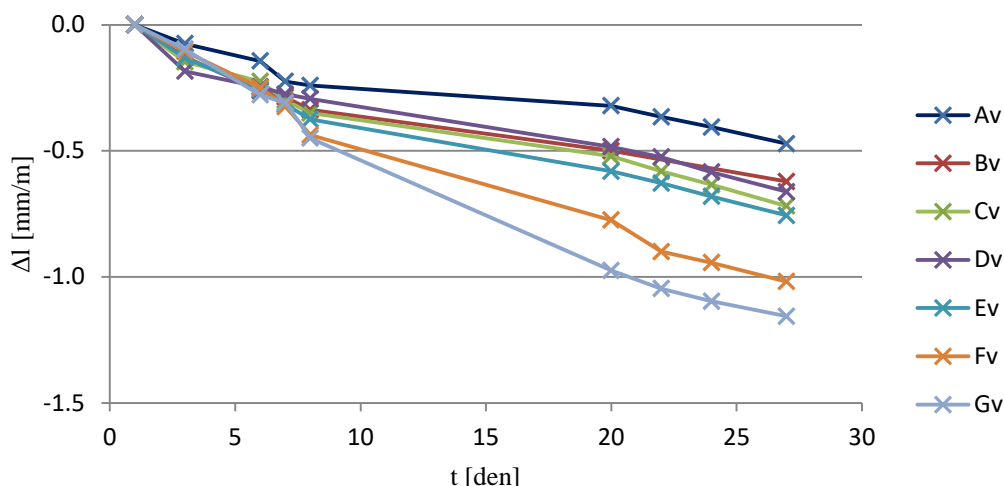
Tabulka 8: namíchané směsi filtrového popílku Tušimice a cihelného obru modifikované vápennou kaší, označení a složení

Označení	Av	Bv	Cv	Dv	Ev	Fv	Gv
popílek [% hm.]	100	95	90	80	70	50	30
CO [% hm.]	0	5	10	20	30	50	70
popílek [g]	600	570	540	480	490	375	225
CO [g]	0	30	60	120	210	375	525
vápenná kaše [% hm.]	20	20	20	20	20	20	20
vápenná kaše [g]	120	120	120	120	140	150	150
voda [g]	498	479	474	470	517	532	498
w/c*	0,75	0,73	0,72	0,71	0,67	0,64	0,60
celková hmotnost pevného podílu [g]	660	660	660	660	770	825	825

\*Zde je brán počítán do pevných materiálů i vápenný hydrát



Obrázek 16: graf pevností v tlaku zkušebních těles z filtrového popílku Tušimice, modifikovaných vápennou kaší v čase



Obrázek 17: graf objemových změn zkušebních těles z filtrového popílku Tušimice modifikovaných vápennou kaší v čase

### Vyhodnocení

Díky přidavku vápenné kaše do systému byly zajištěny měřitelné pevnosti v tlaku po prvním dni zrání. Dále je z obrázku 17 patrné, že pevnosti v tlaku jsou nižší při vyšších přidavcích cihelného ohrusu. V menších přidavcích cihelného ohrusu, se však pravděpodobně projeví jeho pucolánová aktivita. Proto zkušební těleso Bv dosahuje nejvyšších pevností v tlaku. Pevnosti v tlaku dosahují svých maxim při měření po 28 dnech zrání, důvod je stejný jako v 4. 1, hydratační produkty velmi pravděpodobně reagují za vzniku fází s nižšími pevnostmi.

Srovnáním obrázků 14 a 16 (s vápennou kaší a bez vápenné kaše) lze konstatovat, že v systému modifikovaného vápennou kaší je patrný obdobný trend vývoje pevností v tlaku v závislosti na složení. Ale díky přidavku vápenné kaše se zvýší jednotlivé pevnosti v tlaku téměř 2× a přibližně 4× po 60 dnech zrání. Důvodem je to, že přítomnost vyššího obsahu  $\text{Ca(OH)}_2$  podporuje pucolánovou reakci. Dále se, pravděpodobně z nezreagovaného  $\text{Ca(OH)}_2$ , karbonatací stane kalcit, který může rovněž přispět ke lepším pevnostem. Po 90 dnech zrání byla naměřena pevnost u směsi Bv přibližně 15 MPa, což lze přirovnat k pevnosti klasické děrované cihly [32]. Poměrně dobrých výsledků bylo dosaženo i u vzorku Gv (70 % cihelného ohrusu), u kterého přes i přes vysoké zastoupení cihelného ohrusu, byly naměřeny pevnosti přibližně 8 MPa po 90 dnech zrání.

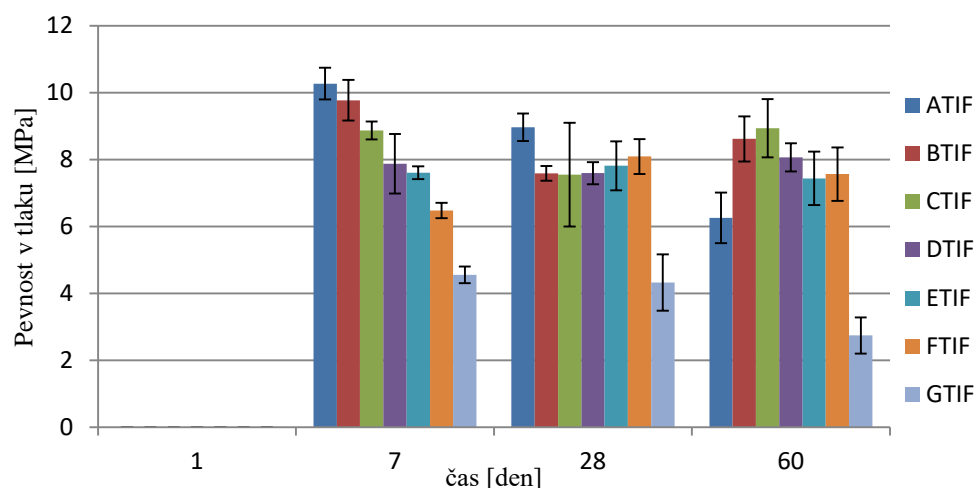
Z obrázku 18 je patrné, že u těles modifikovaných vápennou kaší dochází ke smrštění. Velikost smrštění je závislá na obsahu filtrového popílku, čím ho je více, tím je menší smrštění. Příčinou smršťování je pravděpodobně přeměna portlanditu na kalcit, který má menší objem. U těles s vysokým obsahem filtrového popílku, se ve vyšší míře tvoří ettringit, který má vyšší objem, a proto tyto tělesa mají menší smrštění.

### 4. 3. Pojivový systém na bázi fluidního filtrového popílku z elektrárny Tisová a cihelného ohrusu

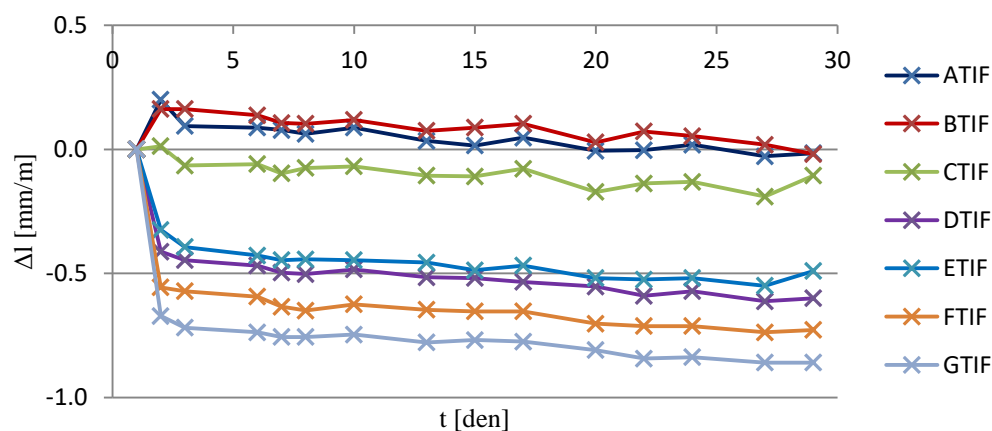
Experimenty popsané v této kapitole studují možnosti využití cihelného ohrusu v pojivovém systému společně s fluidním filtrovým popílkem z elektrárny Tisová. V experimentech je sledován vliv přídavku cihelného ohrusu do systému popílek-ohrus. Složení testovacích směsí je uvedeno viz Tabulka 9 a výsledky viz Obrázek 18 a 19.

Tabulka 9: namíchané směsi filtrového popílku Tisová a cihelného ohrusu, označení a složení

Označení	A <sub>TIF</sub>	B <sub>TIF</sub>	C <sub>TIF</sub>	D <sub>TIF</sub>	E <sub>TIF</sub>	F <sub>TIF</sub>	G <sub>TIF</sub>
popílek [% hm.]	100	95	90	80	70	50	30
CO [% hm.]	0	5	10	20	30	50	70
popílek [g]	700	665	630	560	490	350	225
CO [g]	0	35	70	140	210	350	525
voda [g]	502	494	491	472	445	430	392
w/c	0,72	0,71	0,70	0,67	0,64	0,57	0,52
celková hmotnost pevného podílu [g]	700	700	700	700	700	750	750



Obrázek 18: graf pevností v tlaku zkušebních těles z filtrového popílku Tisová v čase



Obrázek 19: graf objemových změn zkušebních těles z filtrového popílku Tisová v čase

## Vyhodnocení

Z obrázku 18 vyplývá, že všechna zkušební tělesa nemají měřitelné pevnosti v tlaku po 1 dni. Pevnosti po 7 dnech zrání závisí na obsahu cihelného ohrusu, platí, čím vyšší obsah, tím nižší pevnost. V delších časových intervalech se pevnosti v tlaku těles (ATIF–FTIF) vyrovnávají. Avšak u těles receptury ATIF, které neobsahovaly žádný cihelný ohrus, je zaznamenán nejvyšší pokles pevností v tlaku v čase. Pravděpodobně se projevila pucolánová aktivita cihelného ohrusu. Je vidět, že pevnosti v tlaku jsou po 60 dnech zrání nejvyšší u těles CTIF s obsahem filtrového popílku 10 %. Pevnosti tělesa FTIF jsou také poměrně vysoké, i když je zde zastoupen cihelný ohrus jako polovina množství, patrně 50 % přídávku fluidního popílku ještě zaručuje potřebné množství volného vápna.

Objemové změny zkušebních těles jsou závislé na poměru namíchaných směsí. U těles s vyšším obsahem filtrového popílku je znatelný počáteční nárůst, který je pravděpodobně dán vzniklým ettringitem. Dále je z obrázku 19 patrné, že čím více cihelného ohrusu, tím vyšší je počáteční smrštění. Důvodem je odchod póry zadržované vody.



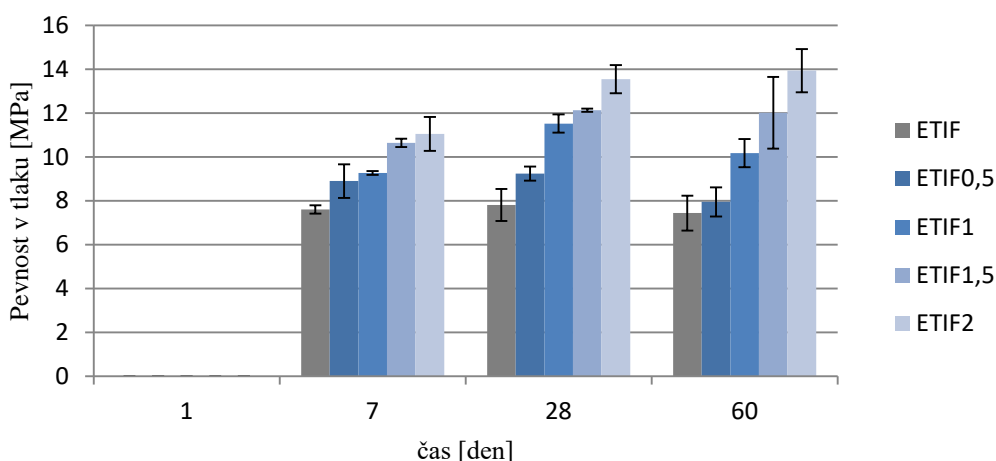
#### 4. 4. Pojivový systém na bázi fluidního filtrového popílku z elektrárny Tisová a cihelného ohrusu s přidavkem plastifikátoru

Experimenty popsáné v této kapitole studují možnosti využití cihelného ohrusu v pojivovém systému společně s fluidním filtrovým popílkem z elektrárny Tisová. V experimentech je sledován vliv přidavku plastifikátoru do studovaného systému popílek-ohrus. Složení testovacích směsí je uvedeno viz Tabulka 10 a výsledky viz Obrázek 20-23. Pro přehlednost je v grafech znázorněn vzorek, který nebyl modifikován.

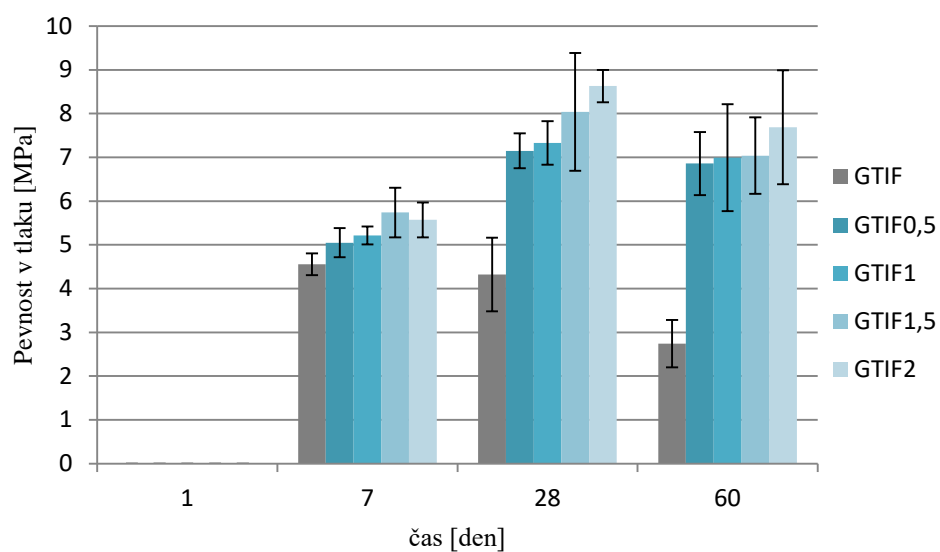
Díky plastifikátoru lze zvýšit pevnosti zkušebních těles. Pro testy byla vybrána záměs ETIF, protože její pevnosti dosahují poměrně vysokých hodnot, i když obsahuje 30 % cihelného ohrusu. Dále byla vybrána směs s GTIF, která má nejnižší pevnosti a obsahuje 70 % cihelného ohrusu.

Tabulka 10: namíchané směsi filtrového popílku Tisová a cihelného ohrusu, modifikované přidavkem plastifikátoru, označení a složení

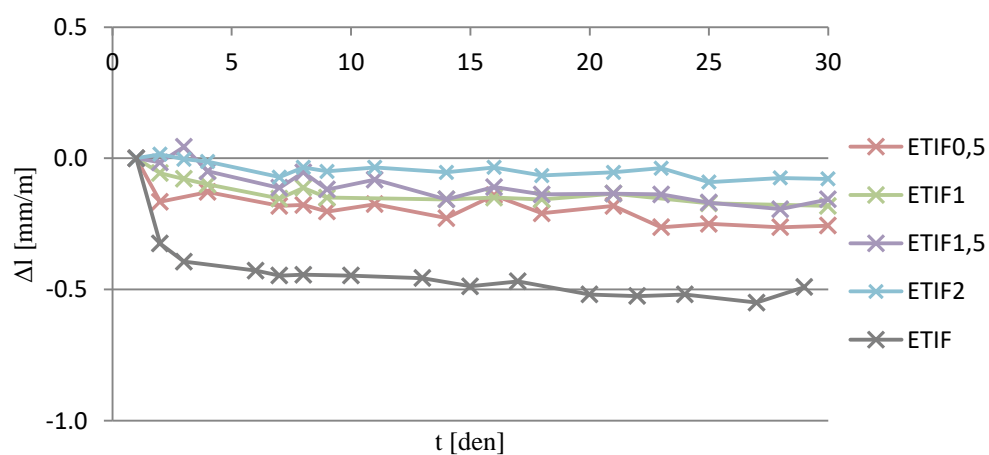
Označení	$E_{TIF}^{0,5}$	$E_{TIF}^1$	$E_{TIF}^{1,5}$	$E_{TIF}^2$	$G_{TIF}^{0,5}$	$G_{TIF}^1$	$G_{TIF}^{1,5}$	$G_{TIF}^2$
popílek [% hm.]	70	70	70	70	30	30	30	30
CO [% hm.]	30	30	30	30	70	70	70	70
popílek [g]	500	500	500	500	300	300	300	300
CO [g]	215	215	215	215	700	700	700	700
voda [g]	415	393	374	357	475	461	442	437
w/c	0,58	0,55	0,52	0,50	0,47	0,46	0,44	0,44
celková hmotnost pevného podílu [g]	715	715	715	715	1000	1000	1000	1000
plastifikátor [% hm.]	0,5	1	1,5	2	0,5	1	1,5	2
plastifikátor [ml]	2,5	5	7,5	10	1,5	3	4,5	6



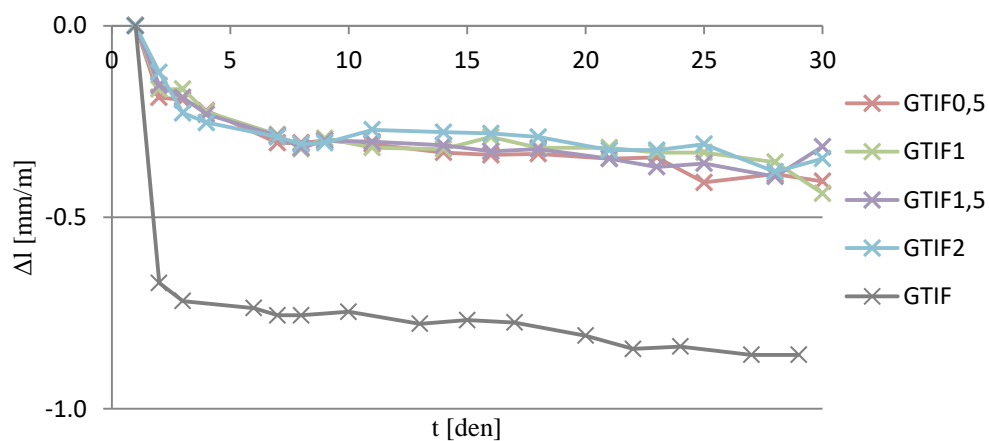
Obrázek 20: graf pevností v tlaku zkušebních těles receptury ETIF v čase



Obrázek 21: graf pevností v tlaku zkušebních těles receptury GTIF v čase



Obrázek 22: graf objemových změn zkušebních těles receptury ETIF s přidavkem plastifikátoru v čase



Obrázek 23: graf objemových změn zkušebních těles receptury GTIF s přidavkem plastifikátoru v čase

## Vyhodnocení

Přídavkem plastifikátoru bylo sníženo množství záměsové vody. Zkušební tělesa s příměsí plastifikátoru nemají měřitelné pevnosti v tlaku po době zrání 1 den. Z obrázků 20 a 21 je zřejmé, že čím vyšší bylo množství plastifikátoru, tím více se zvýšily pevnosti v tlaku zkušebních těles. Porovnáním s tělesem bez přídavku plastifikátoru byl pozorován nárůst pevností. Konkrétně po 60 dnech zrání byla u směsi ETIF 2 téměř 14 MPa, což lze srovnat například s děrovanou cihlou. U směsi GTIF 2 přibližně 7 MPa, tato odpovídá například suché zdící směsi (5–10 MPa) [32, 33].

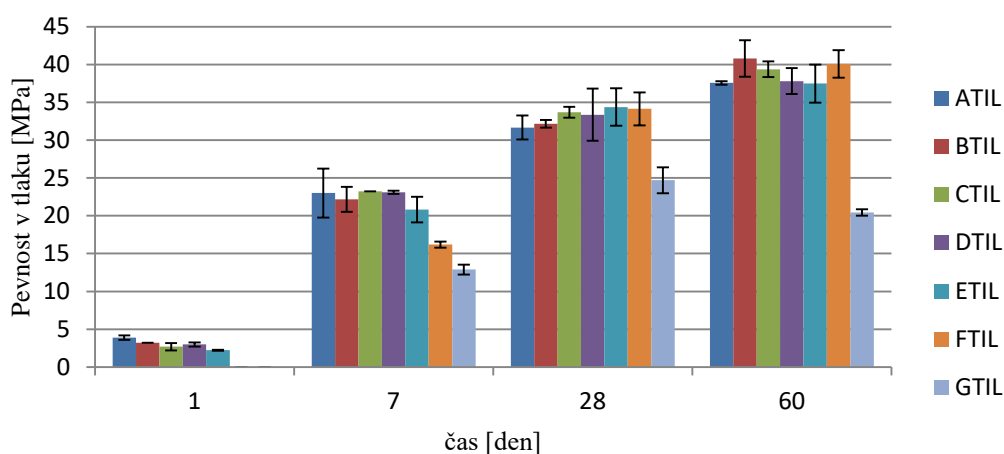
Z grafů na obrázcích 22 a 23 je vidět, že přídavkem plastifikátoru, je sníženo počáteční smrštění tělesa. To je způsobeno nižším přídavkem vody do směsi.

#### 4. 5. Pojivový systém na bázi mletého fluidního ložového popílku z elektrárny Tisová a cihelného ohrusu

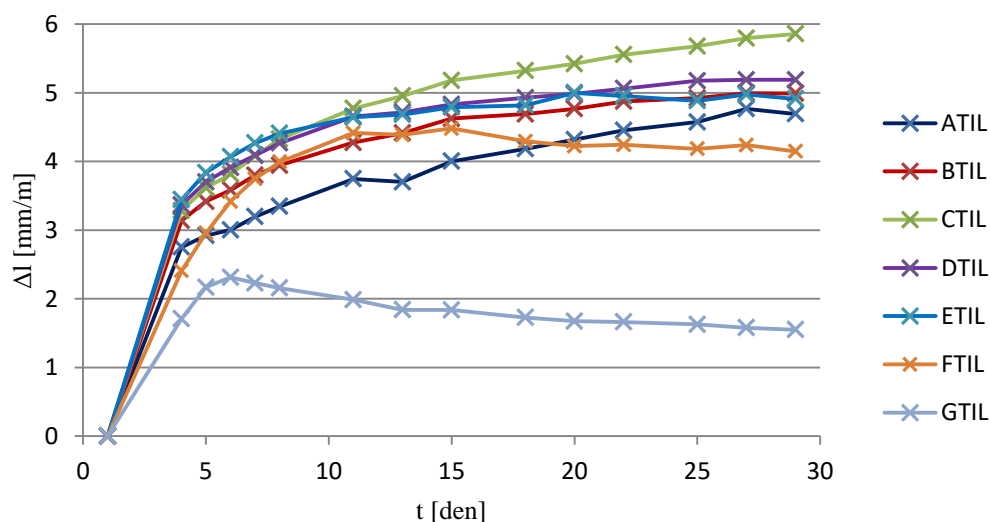
Experimenty popsané v této kapitole studují možnosti využití cihelného ohrusu v pojivovém systému společně s mletým fluidním ložovým popílkem z elektrárny Tisová. V experimentech je sledován vliv přidavku cihelného ohrusu do systému popílek-ohrus. Složení testovacích směsí je uvedeno viz Tabulka 11 a výsledky viz Obrázek 24 a 25.

Tabulka 11: namíchané směsi ložového popílku Tisová cihelného ohrusu, označení a složení

Označení	A <sub>TIL</sub>	B <sub>TIL</sub>	C <sub>TIL</sub>	D <sub>TIL</sub>	E <sub>TIL</sub>	F <sub>TIL</sub>	G <sub>TIL</sub>
popílek [% hm.]	100	95	90	80	70	50	30
CO [% hm.]	0	5	10	20	30	50	70
popílek [g]	1262	665	720	680	595	425	225
CO [g]	0	35	80	170	255	425	595
voda [g]	435	246	286	300	305	319	341
w/c	0,35	0,35	0,36	0,35	0,36	0,38	0,40
celková hmotnost pevného podílu [g]	1262	700	800	850	850	850	850



Obrázek 24: graf pevností v tlaku zkušebních těles z ložového popílku Tisová v čase



Obrázek 25: graf objemových změn zkušebních těles z ložového popílku Tisová v čase

### **Vyhodnocení**

Z obrázku 24 je patrné, že zkušební tělesa, mimo těles FTIL a GTIL, mají měřitelné pevnosti v tlaku již po 1 dni. Pevnosti v tlaku v čase stoupají. Pevnosti v tlaku po 7 dnech zrání mají hodnoty přibližně stejné hodnoty pro směsi ATIL–DTIL, následně pevnosti klesají, čím více je obsažen cihelný ohrus ve směsi. V dalších časových intervalech se pevnosti ETIL a FTIL vyrovnaly zkušebním tělesům s vyšším obsahem popílku. Cihelný ohrus zde vykonává funkci plniva a projevuje se i jeho pucolánová aktivita. Pravděpodobně do obsahu 50 % cihelného ohrusu (FTIL) je v systému dostatek volného vápna, které je předpokladem pro pucolánovou reakci s jemným cihelným ohrusem. I proto jsou naměřeny pevnosti v tlaku u receptury FTIL po 60 dnech zrání přibližně 40 MPa Pevnost tělesa GTIL je vždy nejnížší, neboť obsahuje nejméně ložového popílku, a tedy i volného vápna. Ale s přihlédnutím na to, že obsahuje 70 % cihelného ohrusu, lze pevnosti v tlaku – 20 MPa po 60dnech zrání – považovat za velmi dobré.

Z grafu, který popisuje objemové změny, viz obrázek 25, lze říci, že u všech těles došlo k počátečnímu nárůstu objemu. Důvodem je vytvoření ettringitu, který zvětšuje výslednou velikost tělesa. Lze pozorovat trend, který ukazuje, že čím vyšší obsah cihelného ohrusu, tím dříve těleso přestane zvětšovat svůj objem a vlivem vysychání se začne smršťovat (GTIL a FTIL).

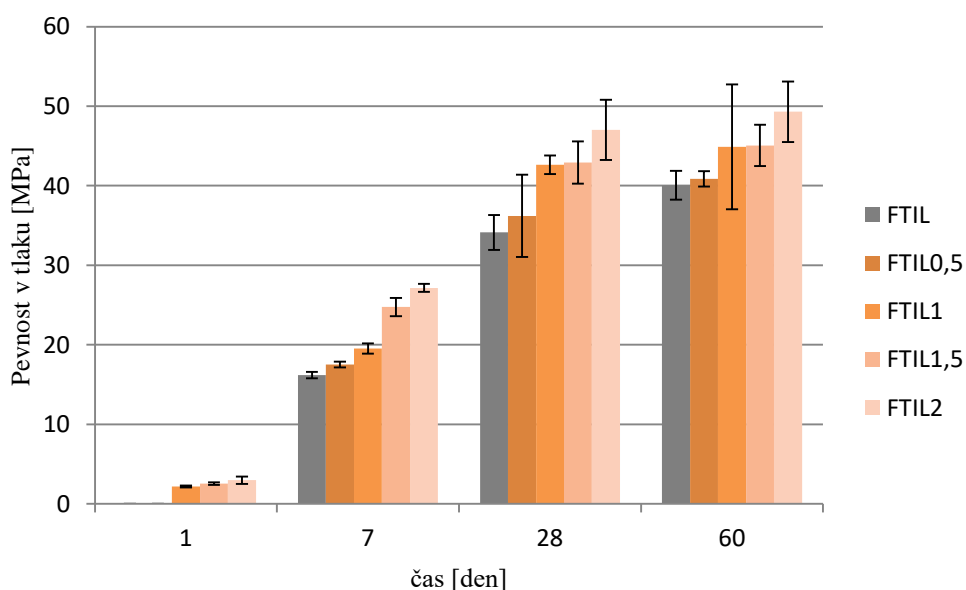
#### 4. 6. Pojivový systém na bázi mletého fluidního ložového popílku z elektrárny Tisová a cihelného ohrusu s přídavkem plastifikátoru

Experimenty popsané v této kapitole studují možnosti využití cihelného ohrusu v pojivovém systému společně s mletým fluidním ložovým popílkem z elektrárny Tisová. V experimentech je sledován vliv přídavku plastifikátoru do studovaného systému popílek-ohrus. Složení testovacích směsí je uvedeno viz Tabulka 12 a výsledky viz Obrázek 26-29.

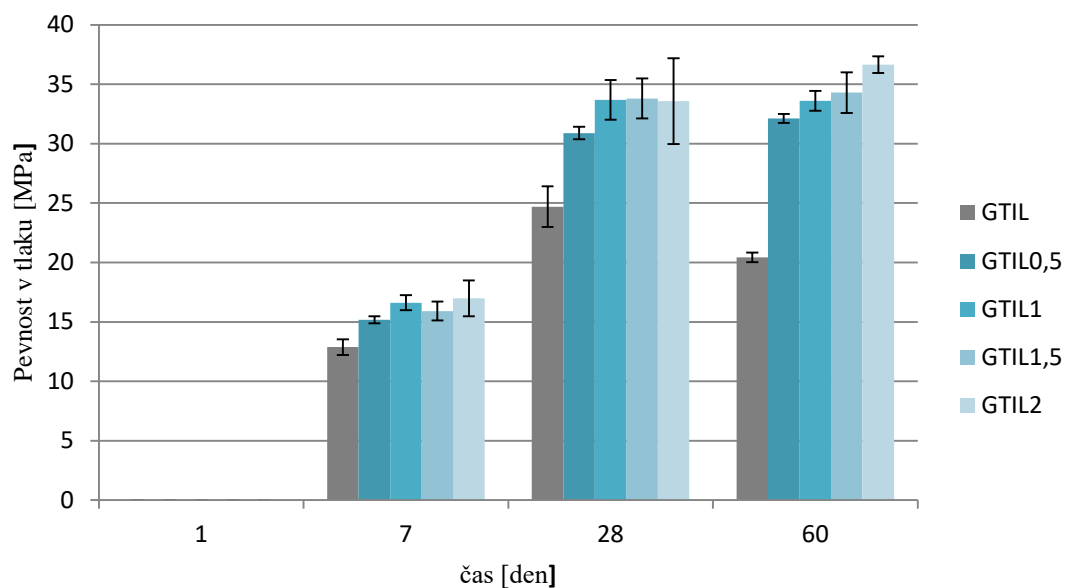
Díky plastifikátoru lze zvýšit pevnosti zkušebních těles. Plastifikátorem byly modifikovány směsi FTIL a GTIL. Tyto směsi byly vybrány, protože obsahují nejvyšší podíl cihelného ohrusu.

Tabulka 12: namíchané směsi ložového popílku Tisová a cihelného ohrusu, modifikované přídavkem plastifikátoru, označení a složení

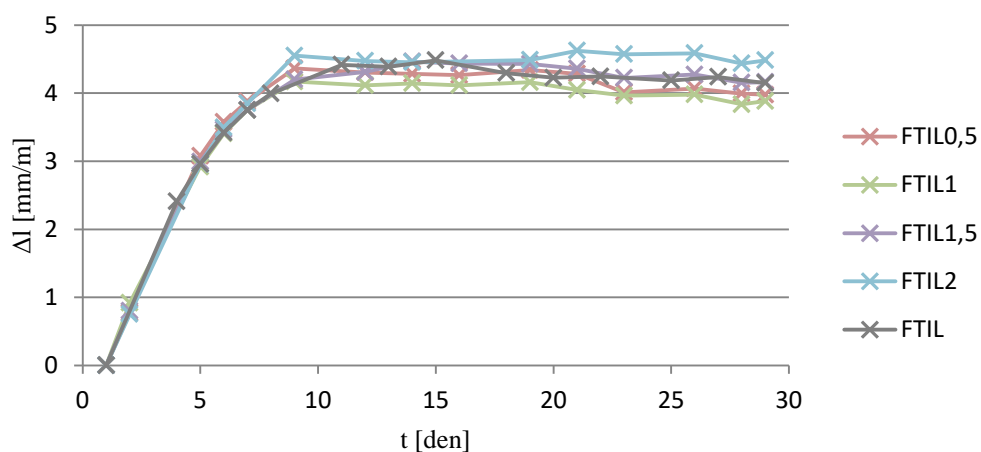
Označení	$F_{TIL}^{0,5}$	$F_{TIL}^1$	$F_{TIL}^{1,5}$	$F_{TIL}^2$	$G_{TIL}^{0,5}$	$G_{TIL}^1$	$G_{TIL}^{1,5}$	$G_{TIL}^2$
popílek [%]	50	50	50	50	30	30	30	30
ohrus [%]	50	50	50	50	70	70	70	70
popílek [g]	400	400	400	400	300	300	300	300
ohrus [g]	400	400	400	400	700	700	700	700
voda [g]	281	260	250	232	365	352	340	328
w/c	0,35	0,33	0,31	0,29	0,36	0,35	0,34	0,33
celková hmotnost [g]	800	800	800	800	1000	1000	1000	1000
plastifikátor [%]	0,5	1	1,5	2	0,5	1	1,5	2
plastifikátor [ml]	2	4	6	8	1,5	3	4,5	6



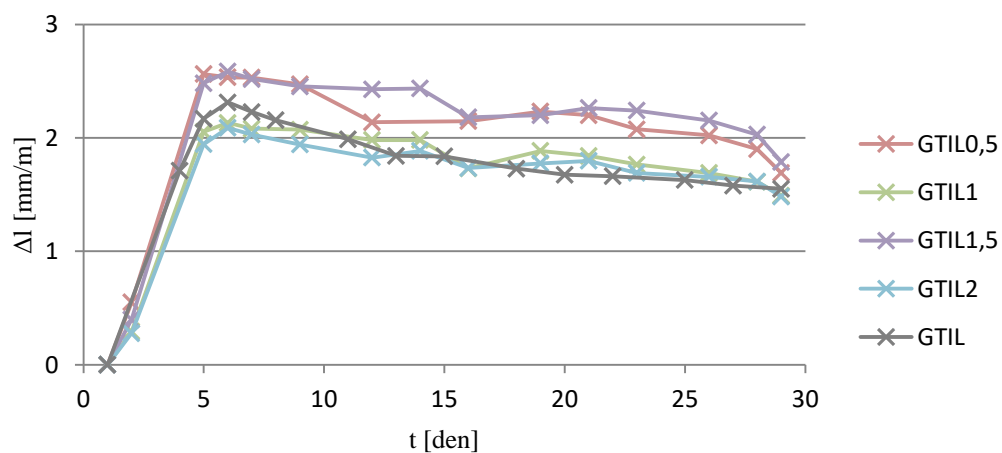
Obrázek 26: graf pevností v tlaku zkušebních těles receptury FTIL v čase



Obrázek 27: graf pevností v tlaku zkušebních těles receptury GTIL v čase



Obrázek 28: graf objemových změn zkušebních těles receptury FTIL s přidavkem plastifikátoru v čase



Obrázek 29: graf objemových změn zkušebních těles receptury GTIL s přidavkem plastifikátoru v čase

## Vyhodnocení

Z grafu na obrázku 25, kde jsou pevnosti vzorků s obsahem ohrusu a popílku 50 : 50, je patrné, že přidavkem plastifikátoru bylo dosaženo měřitelných pevností v tlaku po 1 dni zrání, vyjma vzorku s obsahem 0,5 % SP. Na obrázku 26 je vidět, že u směsi s obsahem 70 % cihelné ho ohrusu a 30 % popílku nebylo ani s přidavkem plastifikátoru dosaženo měřitelných pevností po jednom dni zrání. Pevnost v tlaku u těles závisí na množství přidaného plastifikátoru, platí čím vyšší přídavek, tím nižší obsah vody a vyšší pevnost v tlaku. Vývoj pevností v tlaku v čase u těles receptury FTIL modifikovaných plastifikátorem je obdobný jako u těles nemodifikovaných. U těles receptury GTIL, se pevnosti v tlaku u těles modifikovaných plastifikátorem zvyšovaly, ale u tělesa bez modifikace se pevnost po 60 dnech zrání snížila. Jestli by tohoto snížení dosáhla i tělesa s přidavkem plastifikátoru by bylo možné potvrdit po delším čase. Pevnost po 60 dnech zrání byla naměřena u směsi FTIL 2 téměř 50 MPa a u směsi GTIL 2 přibližně 35 MPa. Do budoucna by bylo vhodné zabývat se optimalizací poměru plastifikátor/voda a typem použitého plastifikátoru.

Na obrázcích 29 a 30 je vidět, že přídavek plastifikátoru nemá téměř žádný vliv na objemovou stálost připravených testovacích těles.



## 5. ZÁVĚR

V této práci byly testovány alternativní pojivové systémy na bázi fluidních popílků a cihelného ohrusu. K experimentům byly použity fluidní filtrové popílký z elektráren Tušimice a Tisová a jemně mletý ložový popel z elektrárny Tisová. Jako další složky byl v těchto systémech testován cihelný ohrus. Cihelný ohrus byl použit ze závodu firmy HELUZ v Hevlíně. Ve zkušebních systémech byly dále experimentálně testovány přídavky vápenné kaše a chemických modifikujících přísad.

U vzorků připravených z filtrového popílku Tušimice bylo zjištěno, že optimálním poměrem množství popílku a cihelného ohrusu je složení zkušebního tělesa BF (5 % cihelného ohrusu). Celkově však mají pevnosti v tlaku nízké hodnoty i z důvodu malého obsahu volného vápna. Modifikací vzorků připravených z filtrového popílku Tušimice vápennou kaší bylo zjištěno, že optimální poměr je opět u směsi Bv (5 % cihelného ohrusu). Po 90 dnech zrání byla naměřena pevnost u směsi Bv přibližně 15 MPa. Díky přídavku vápenné kaše byly navýšeny pevnosti a navíc zajištěny měřitelné pevnosti v tlaku po 1 dni zrání. Poměrně dobrých výsledků bylo dosaženo i u vzorku Gv (70 % cihelného ohrusu), přibližně 8 MPa po 90 dnech zrání.

Díky zkušebním tělesům připraveným z filtrového popílku Tisová bylo určeno, že optimálním složením je CTIF (10 % cihelného ohrusu). Poměrně malé pevnosti jsou pravděpodobně dány i vysokým obsahem vody ve směsi. Pomocí plastifikátoru byly sníženy potřeby záměsové vody a byly zvýšeny pevnosti vybraných receptur z filtrového popílku Tisová. Navíc bylo zmenšeno počáteční smrštění. Nejlepší se mi jevila receptura ETIF 2; která dosáhla pevností přibližně 14 MPa po 60 dnech zrání.

U vzorků připravených z ložového popílku Tisová bylo zjištěno, že u obou testovaných množství přidávaného cihelného ohrusu (50 a 70 % hmot.), může být dosaženo obstojných pevností v tlaku. U směsí FTIL a GTIL byly naměřeny dobré pevnosti v tlaku i po 60 dnech zrání. Navíc byly u těchto směsí zaznamenány nejmenší objemové změny ve srovnání s ostatními testovanými recepturami této řady. Značnou nevýhodou těchto směsí je skutečnost, že manipulačních pevností dosahují, až po dvou dnech zrání. V reálné výrobě by tato skutečnost mohla způsobovat komplikace. Tento nedostatek byl experimentálně řešen přídavkem plastifikátoru. S přidáním plastifikátorem byly zvýšeny pevnosti u těchto záměsů z ložového popílku Tisová. Jako nejlepší směs byla vyhodnocena směs FTIL 2. Jedná se o směs s obsahem 50 % cihelného ohrusu, měřitelnými pevnostmi po 1 dni zrání a celkově nejvyššími pevnostmi naměřenými v této práci – více než 45 MPa po 28 dnech zrání a téměř 50 MPa po 60 dnech zrání. Celkově lze konstatovat, že všechny směsi v tomto experimentu dosahovaly dobrých pevností v tlaku, což je do budoucna předpokladem pro vhodné využití.

Lze říci, že při řešení této bakalářské práce byl nalezen směr, „kam s ním“, tedy s vybranými odpady – cihelným ohrusem a fluidním popílkem. Zpracováním těchto druhotných surovin by odpadly náklady na uložení a snížila by se i ekologická zátěž okolí. Využitím vlastností tohoto testovaného systému by bylo možné definovat nové materiály se širokým využitím podle jejich vlastností. Tato skutečnost by měla nejen ekonomický, ale i ekologický dopad. Například využitím popílku jako pojiva by odpadla ekologická zátěž s výrobou klasických pojiv, jako je portlandský cement. Řešené téma je aktuální, do budoucna by bylo jistě dobré se touto problematikou zabývat a hledat nové možnosti uplatnění již vyrobených druhotných materiálů.

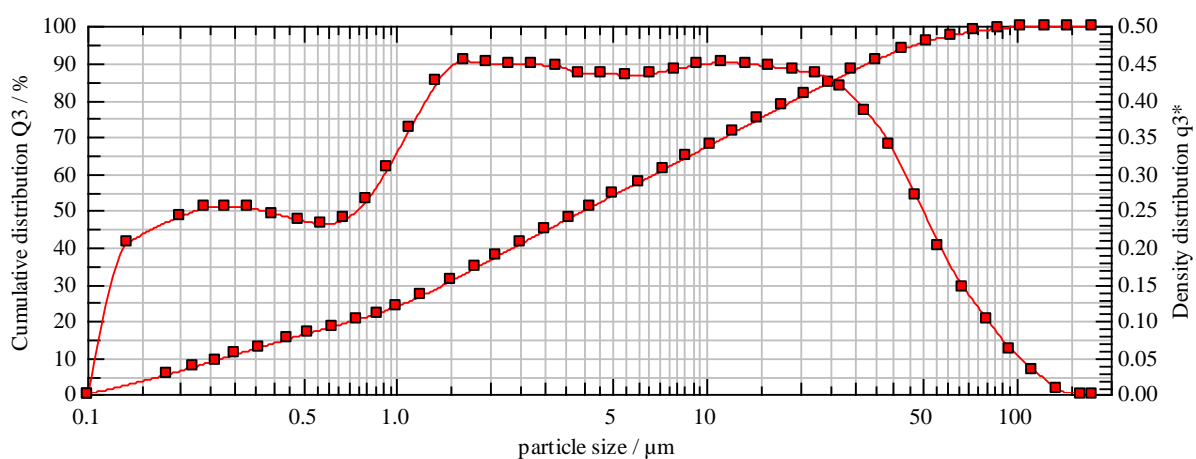
## 6. LITERATURA

- [1]: Kam s ním? NERUDA, Jan. *Žerty, hravé i dravé*. Melantrich, 1929.
- [2]: HLAVÁČ, Jan. *Základy technologie silikátů*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1981.
- [3]: HANYKÝŘ, Vladimír a Jaroslav KUTZENDOERFER. *Technologie keramiky*. Hradec Králové: Vega, 2000, 287 s. ISBN 8090086063.
- [4]: PYTLÍK, Petr. Cihlářství. Brno: CERM, 1995. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0612-7.
- [5]: SVOBODA, Luboš. Stavební hmoty. 2. přeprac. a dopl. vyd. Bratislava: Jaga, 2007, 400 s. : il. ISBN 978-80-8076-057-1.
- [6]: PYTLÍK, Petr a Radomír SOKOLÁŘ. Stavební keramika: technologie, vlastnosti a využití. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 80-720-4234-3.
- [7]: Svpomoci.cz. Cihly HELUZ – jak se vyrábí cihly HELUZ v cihelně Hevlín. *heluz.cz* [online]. 2016-11-21 [cit. 2017-04-05]. Dostupné z <http://www.heluz.cz/cs/video-jak-se-vyrabi-nase-cihly>
- [8]: GAIDZINSKI, Roberta, Jamil DUAİLİBI FH. a Luís Marcelo TAVARES. Influence of aging on the technological properties of clays in the ceramic industry. *Applied Clay Science* [online]. Elsevier B.V, 2011, 54(1), 47-52 [cit. 2017-04-05]. DOI: 10.1016/j.clay.2011.07.011. ISSN 01691317. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S016913171100264>
- [9]: Rovnaníková, P. - Navrátilová, E. - Šmerdová, L.: Možnosti využití pálených jílu ve vápenných maltách. Vysoké učení technické v Brně, <http://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/9554-moznosti-vyuziti-palenyh-jilu-ve-vapennych-maltach>
- [10]: Jak se vyrábějí pálené cihly HELUZ. In: Vše pro váš dům [online]. 2008 [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: <http://www.vseprovasdum.cz/jak-se-vyrabeji-palene-cihly-heluz.html>
- [11]: KEJÍK, Pavel. Rozpustnost elektrárenských popílků ve vysoce alkalickém prostředí. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická, 2010
- [12]: BALÁŠ, Marek, Martin LISÝ a Jiří MOSKALÍK. Kotle - 2. část. In: TZB-info [online]. 2012 [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/8438-kotle-2-cast>
- [13]: HAVLICA, J, J BRANDSTETR a I ODLER. Possibilities of Utilizing Solid Residues from Pressured Fluidized Bed Coal Combustion (PSBC) for the Production of Blended Cements. *Cement and Concrete Research* [online]. Elsevier, 1998, 28(2), 299-307 [cit. 2017-04-09]. DOI: 10.1016/S0008-8846(97)00258-5. ISSN 00088846. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0008884697002585>
- [14]: KNĚZEK, Josef. Ekologické a ekonomické zpracování průmyslových odpadních materiálů. 4. díl, Stavební kompozity s aplikací jemnozrnných průmyslových odpadních materiálů. Brno: Výzkumný ústav stavebních hmot, 2012, 261 s. : il. ; 26 cm. ISBN 9788087397053.
- [15]: RICHTER, Jan, Tomáš SVĚRÁK a Petr STEHLÍK. *Chemické inženýrství I*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2004. ISBN 80-214-2568-7.
- [16]: Opravil T.: Příprava kompozitů netradičního složení na bázi tuhých zbytků fluidního spalování uhlí, Diplomová práce FCH VUT Brno, 2005

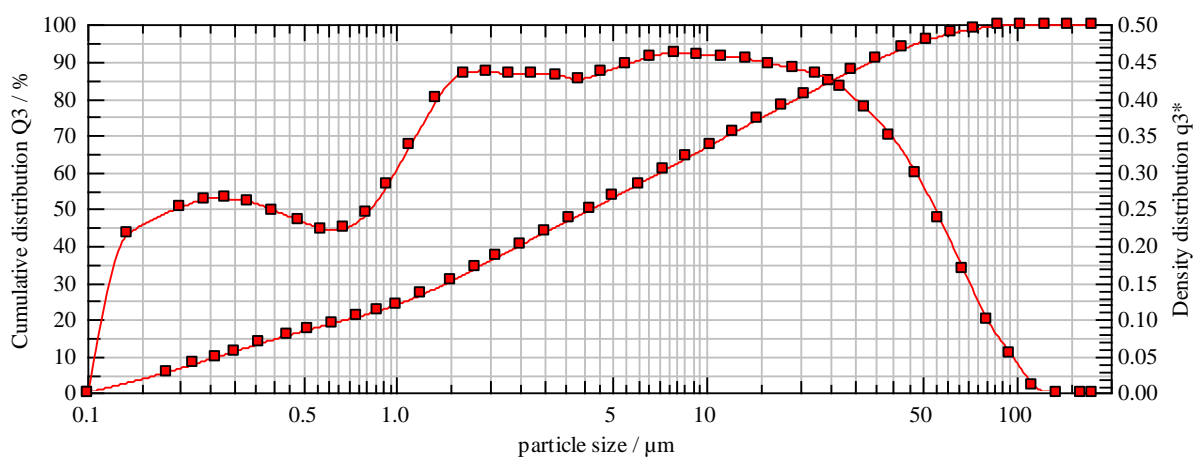
- [17]: CHEN, Zhen, Haiming WANG, Jiankun ZHUO a Changfu YOU. Experimental and numerical study on effects of deflectors on flow field distribution and desulfurization efficiency in spray towers. *Fuel Processing Technology*. 2017, 162, 1-12. DOI: 10.1016/j.fuproc.2017.03.024. ISSN 03783820. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378382017301583>
- [18]: MOSHIRI, H., H. ALE EBRAHIM a B. NASERNEJAD. Various Methods to Prepare High-Efficiency CaO Sorbents for Improved SO<sub>2</sub> Capture Capacity. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2016, **36**(5), 231-240. DOI: 10.1080/19392699.2015.1111877. ISSN 1939-2699. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19392699.2015.1111877>
- [20]: WU, Shengji, Md. Azhar UDDIN, Caili SU, Shinsuke NAGAMINE a Eiji SASAOKA. Effect of the Pore-Size Distribution of Lime on the Reactivity for the Removal of SO<sub>2</sub> in the Presence of High-Concentration CO<sub>2</sub> at High Temperature. *Industrial & Engineering Chemistry Research* [online]. 0210n. 1., **41**(22), 5455-5458 [cit. 2017-04-11]. DOI: 10.1021/ie020362a. ISSN 08885885. Dostupné z: <http://pubs.acs.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/doi/pdf/10.1021/ie020362a>
- [21]: MOSHIRI, H., H. ALE EBRAHIM a B. NASERNEJAD. Various Methods to Prepare High-Efficiency CaO Sorbents for Improved SO<sub>2</sub> Capture Capacity. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2016, **36**(5), 231-240. DOI: 10.1080/19392699.2015.1111877. ISSN 1939-2699. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19392699.2015.1111877>
- [22]: ŠKVÁRA, František. *Technologie anorganických pojiv II: užití maltovin : koroze cementu*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1995. ISBN 80-708-0225-1.
- [23]: ROVNANÍKOVÁ, Pavla. *Omítky: chemické a technologické vlastnosti*. Praha: STOP, 2002, 89 s. : il. ISBN 8086657000.
- [24]: ŠKVÁRA, František. *Technologie anorganických pojiv I*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1995. ISBN 80-708-0224-3.
- [25]: BAJZA, Adolf a Ildiko ROUSEKOVÁ. *Technológia betónu*. Bratislava: Jaga, 2006, 190 s. : il., plány, příklady. ISBN 8080760322.
- [26]: Technický list: CHRYSO® Fluid Optima 208 Silně vodoredukující/superplastifikační přísada. In: [Http://www.chryso.cz](http://www.chryso.cz) [online]. 2009 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://www.chryso.cz/p/7500/3/2640/cz>
- [27]: Technický list: Zkušební pracoviště BS-3310. In: Betonsystem [online]. 2003 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://www.betonsystem.cz/PDF/TL%20DESTTEST%203310.pdf>
- [28]: MÁSilKO, Jiří. "Rentgenová difrakční analýza na práškových vzorcích." ChemPoint [cit. 2014-04-5]. Dostupné z [www.chempoint.cz/rentgenova-difrakcni-analyza-na-praskovychvzorcich](http://www.chempoint.cz/rentgenova-difrakcni-analyza-na-praskovychvzorcich) (2011).
- [29]: Metody výzkumu struktur minerálů. In: *Multimediální studijní texty z mineralogie pro bakalářské studium* [online]. 2013 [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: [http://mineralogie.sci.muni.cz/kap\\_5\\_2\\_metody\\_strukt/kap\\_5\\_2\\_metody\\_strukt.htm#](http://mineralogie.sci.muni.cz/kap_5_2_metody_strukt/kap_5_2_metody_strukt.htm#)
- [30]: DOLNÍČEK, Zdeněk. Laboratorní metody výzkumu. In: *Geologie Univerzita Palackého v Olomouci* [online]. Olomouc, 2007 [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: [http://www.geology.upol.cz/upload/studijni\\_materialy/plne\\_texty\\_skript/2005\\_Dolnicek\\_Zdene\\_k\\_Metody\\_laboratorniho\\_vyzkumu.pdf](http://www.geology.upol.cz/upload/studijni_materialy/plne_texty_skript/2005_Dolnicek_Zdene_k_Metody_laboratorniho_vyzkumu.pdf)

- [31]: Laserový analyzátor velikosti částic: SYMPATEC HELOS KR. In: Centrum materiálového výzkumu [online]. 2011 [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: <http://www.materials-research.cz/cz/laboratore/laborator-anorganickych-pojiv/laserovy-analyzator-velikosti-castic/?preview=3bf4f81fd6d5fe3f694bdc1473e86e1c>
- [32]: Základní znalosti. In: *Fischer* [online]. 2017 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: [http://www.fischer-cz.cz/PortalData/12/Resources/support/basic-knowledge/documents/1\\_druhy\\_stavebni\\_ch\\_materi\\_1.pdf](http://www.fischer-cz.cz/PortalData/12/Resources/support/basic-knowledge/documents/1_druhy_stavebni_ch_materi_1.pdf)
- [33]: Weber.mix zdící. In: *Weber* [online]. 2017 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <https://www.weber-terranova.cz/zakladni-omitkove-a-maltove-smesi/vyroby/malty-webermix/zdici-malty-webermix/webermix-zdici-5-mpa10-mpa.html>

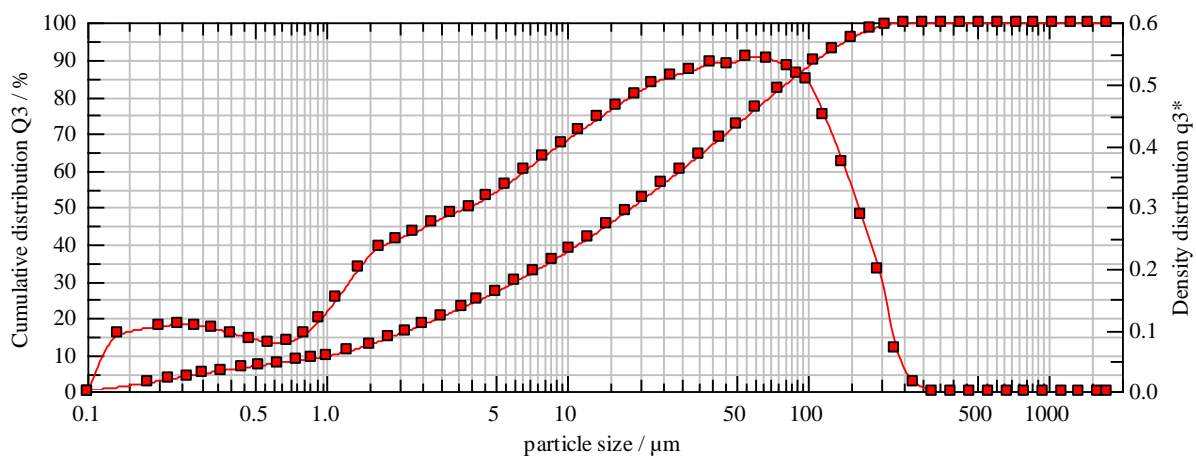
## 7. PŘÍLOHY



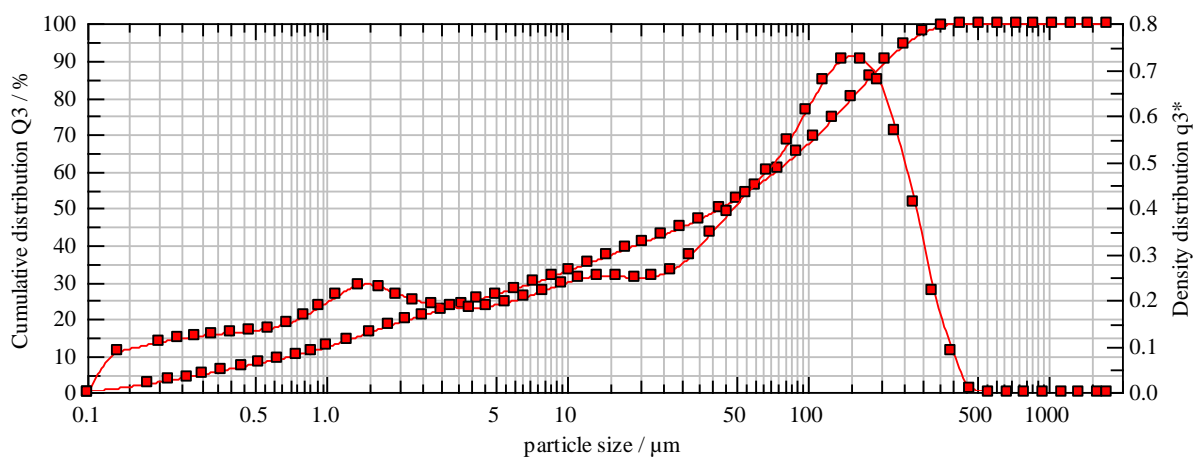
Obrázek 30: příklad záznamu měření velikosti částic pro cihelný obrus Family



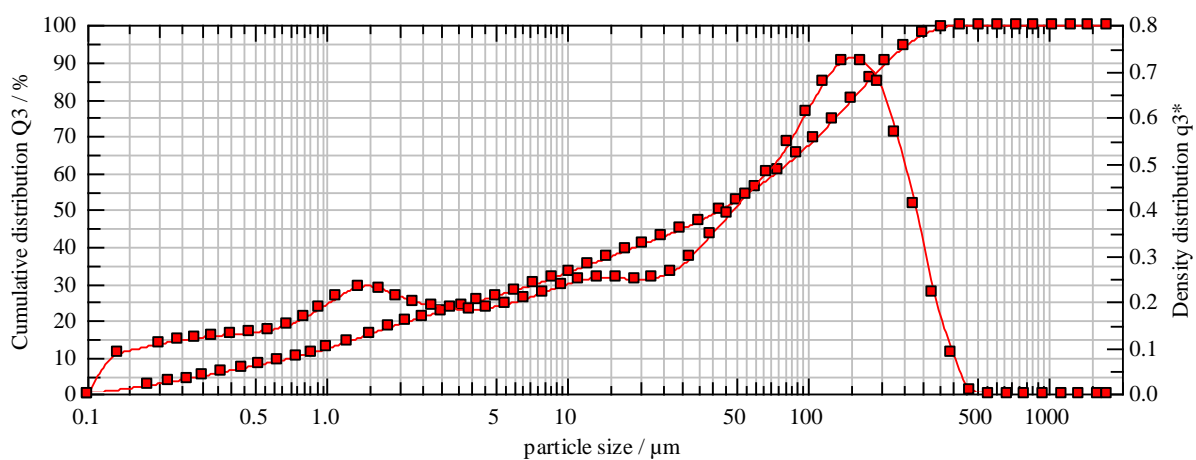
Obrázek 31: příklad záznamu měření velikosti částic pro cihelný obrus B



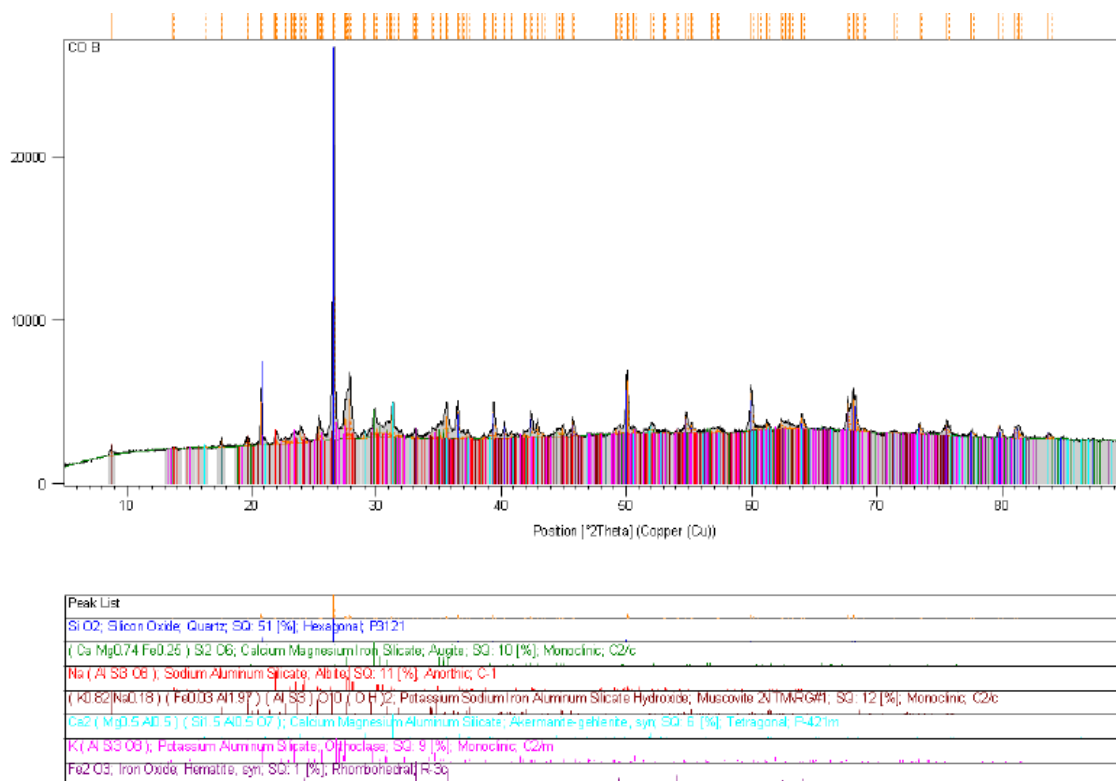
Obrázek 32: příklad záznamu měření velikosti částic pro fluidní filtrový popílek Tušimice



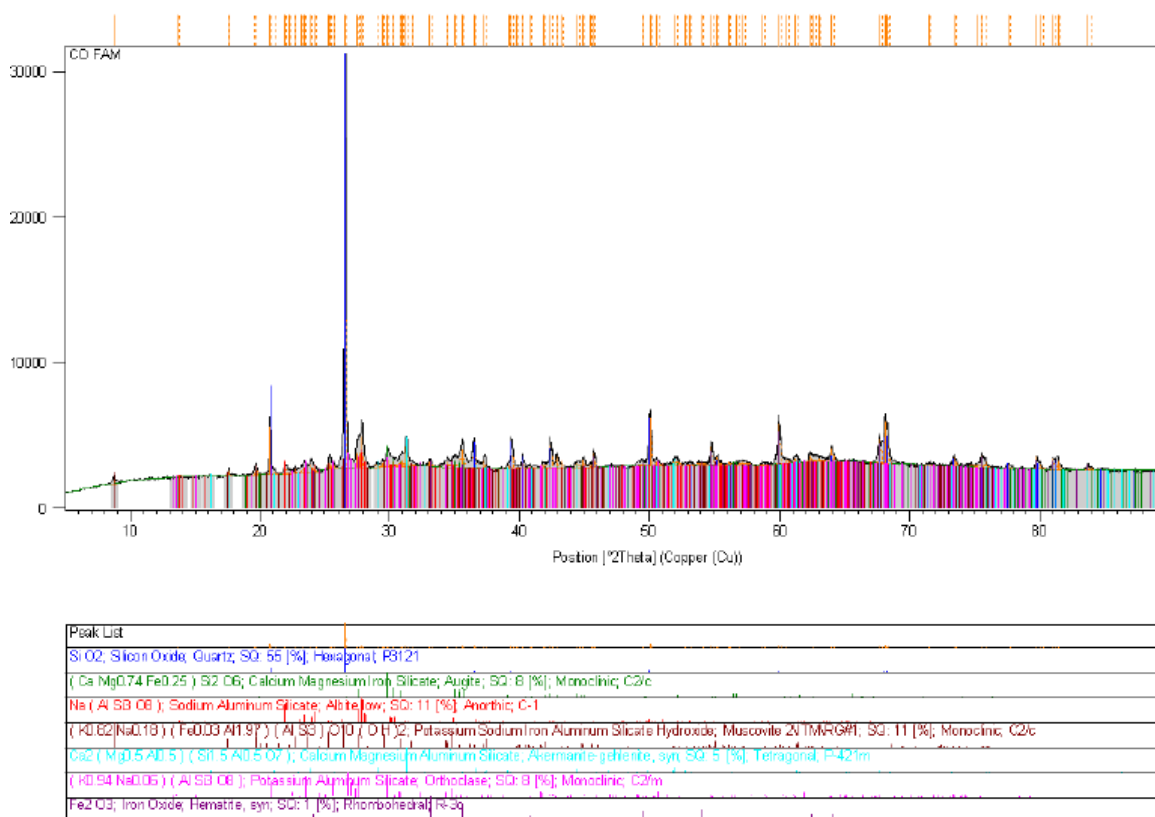
Obrázek 33: příklad záznamu měření velikosti částic pro fluidní filtrový popílek Tisová



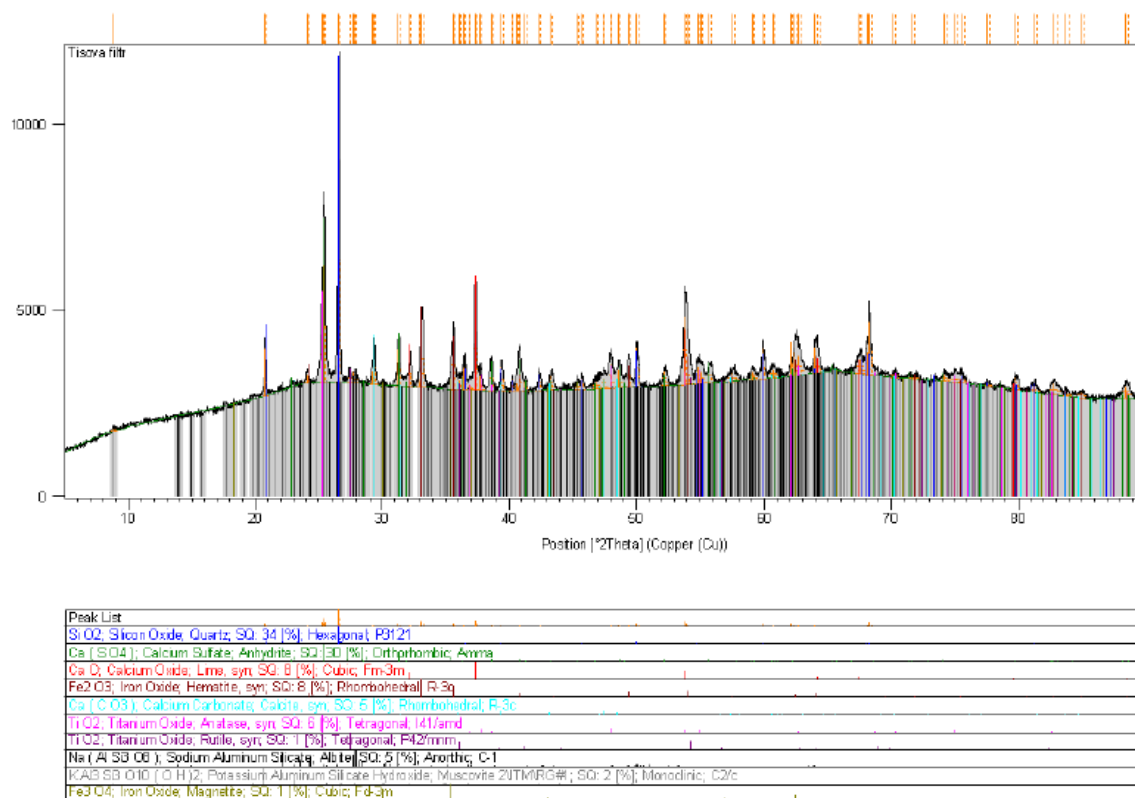
Obrázek 34: příklad záznamu měření velikosti částic pro fluidní pomletý ložový popílek Tisová



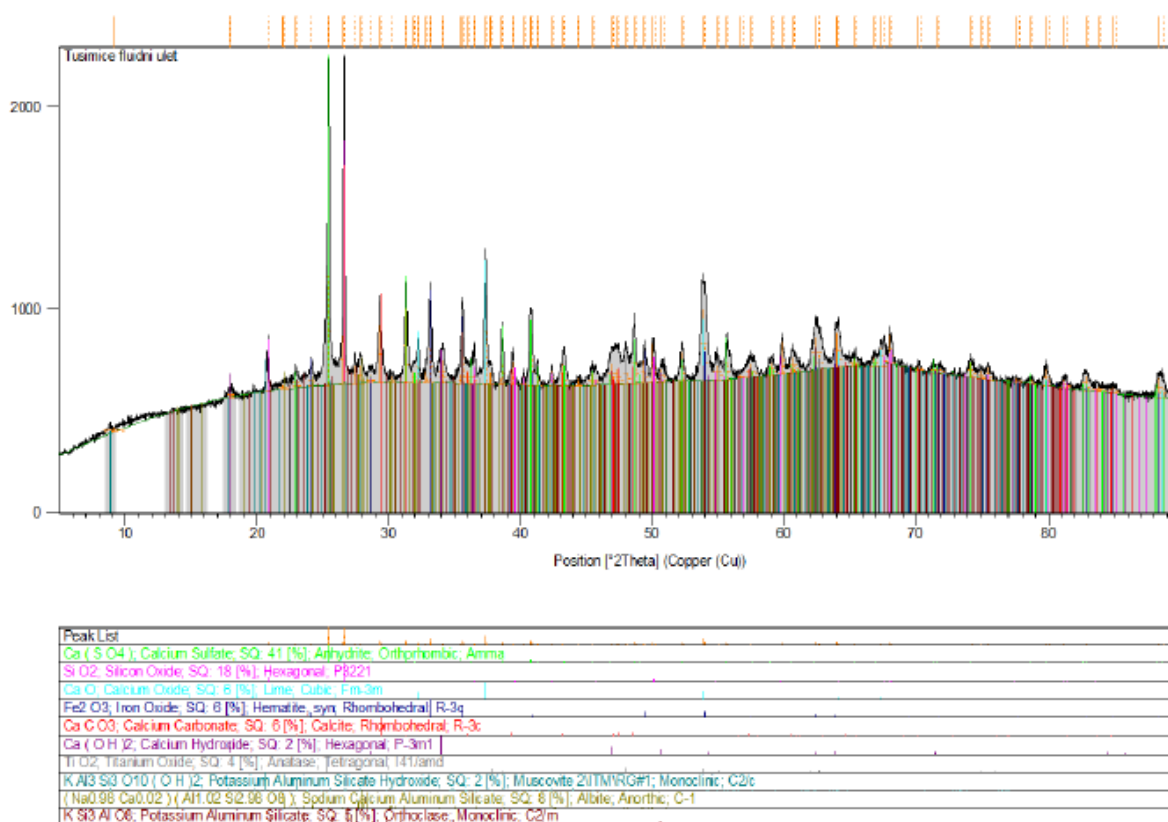
Obrázek 35: záznam RTG analýzy cihelného obrusu B



Obrázek 36: záznam RTG analýzy cihelného obrusu Family



Obrázek 37: záznam RTG analýzy fluidního filtrového popílku elektrárny Tisová



Obrázek 38: záznam RTG analýzy fluidního filtrového popílku elektrárny Tušimice





Obrázek 39: záznam RTG analýzy fluidního ložového popílku z elektrárny Tisová